

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANSELMO FABRIS

**INFLUÊNCIA DA FORÇA DO PRENSA-CHAPAS NA
CONFORMABILIDADE DO AÇO HSLA440**

**CURITIBA
2014**

ANSELMO FABRIS

**INFLUÊNCIA DA FORÇA DO PRENSA-CHAPAS NA
CONFORMABILIDADE DO AÇO HSLA440**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor De Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito para obter o título de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Concentração Manufatura.

Orientador : Prof. Dr. Paulo Victor Prestes Marcondes

Coorientador: Prof .Dr Ravilson Chemin Filho

CURITIBA

2014

Fabris, Anselmo

Influência da força do prensa-chapas na conformabilidade do aço
HSLA440 / Anselmo Fabris. – Curitiba, 2014.

86 f. : il.; tabs.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Paulo Victor Prestes Marcondes

Coorientador: Ravilson Chemin Filho

Bibliografia: p. 79-86

1. Estampagem (Trabalhos em metal). 2. Chapas de aço.
3. Conformação de metais. I. Chemin Filho, Ravilson. II. Marcondes,
Paulo Victor Prestes. III. Título.

CDD 621.984

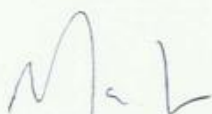
TERMO DE APROVAÇÃO

ANSELMO FABRIS

INFLUÊNCIA DA FORÇA DO PRENSA CHAPAS NA CONFORMABILIDADE DO AÇO HSLA 440

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção de grau de Mestre em Engenharia Mecânica, área de concentração Manufatura, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

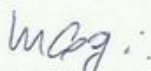
Banca Examinadora:



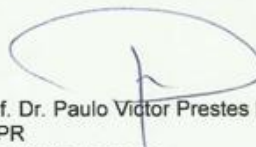
Prof. Dr. Márcio Mafra
UTFPR



Prof. Dr. Heraldo Nélcio Cambraia
UFPR



Prof. Dr. Manoel Lutero Gipiela
SENAI-PR



Prof. Dr. Paulo Victor Prestes Marcondes
UFPR
Presidente da banca

Curitiba, 20 de maio de 2014.

***Dedico este trabalho à
minha esposa Marilda e aos meus filhos
Júlia e Júlio Cesar***

AGRADECIMENTOS

À Deus, que me possibilitou realizar este trabalho.

À minha família, pelo apoio e incentivo.

Aos professores Dr. Paulo Victor Prestes Marcondes e Dr. Ravilson Chemin Filho pela orientação e auxílio prestados durante a realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Manolo Lutero Gipiela, pela ajuda incondicional na realização dos ensaios de laboratório.

A todos os companheiros que de uma forma ou de outra colaboraram para que eu pudesse desenvolver este trabalho.

RESUMO

Para se produzir peças estampadas de qualidade, com baixo custo e otimização do processo, se faz necessário uma compreensão da conformabilidade de chapas metálicas. Esta conformabilidade é difícil de ser prognosticada em virtude dos vários parâmetros que influem no processo de estampagem como geometria do ferramental, material, força do prensa-chapas, condições de lubrificação e outros. Durante testes de ferramentas de estampagem é necessário o ajuste desses parâmetros a fim de se otimizar o processo. Ensaio de estampagem se fazem necessários para se determinar a curva limite de conformação do material (ensaio Nakazima) que prevê a máxima deformação que o material sofre até o instante em que ocorre a ruptura, sendo assim uma ferramenta de grande importância na otimização do processo de estampagem, proporcionando segurança para que o produto seja fabricado sem apresentar falhas. O objetivo deste trabalho é estudar a influência da força do prensa-chapas na conformabilidade do aço HSLA440, de muito uso de componentes automotivos. Pelos resultados obtidos verificou-se que existe uma força crítica no prensa-chapas abaixo da qual a uma perda da conformabilidade do aço HSLA440 e acima um ganho na conformabilidade do mesmo. Como conclusão do trabalho, pode-se afirmar que a força do prensa-chapas é altamente significativa na conformação desse aço, pois o seu ajuste correto pode levar a um ganho considerável na conformabilidade do material, permitindo a produção satisfatória de peças com maior grau de complexidade sem riscos de falhas.

Palavras-chave: Estampagem. Curva CLC. Prensa-Chapas.

ABSTRACT

In order to produce stampings of quality, with low cost and process optimization, an understanding of the material formability is needed. This formability is difficult to be predicted because of various parameters that influence the process of stamping: as tooling geometry, material strength, blank-holder force (BHF), lubrication conditions and others. During the developing of stamping tools to adjust these parameters in order to optimize the process is necessary. The material Forming Limit Curve (FLC) – obtained by Nakazima test – can provides the maximum strain that the material suffers until the moment when the rupture occurs. The FLC is a very important tool for the optimization of the stamping process since can provides the product manufacture without fail. The objective of this work was to study the influence of the blank-holder force during forming of HSLA440 steel sheets. Experimental tests for material characterization and forming Nakazima tests were performed using the high-strength HSLA440 steel. In this study the FLC was obtained by Nakazima tests with almost complete locking of the material flow using the peak force of the hydraulic press (1002 kN) and thereafter varying the BHF level. For each value of used load the major true strain were measured and compared to FLC obtained by the Nakazima test. From the results obtained it was found that there is a critical force in the BHF that below this load a loss in the HSLA440 steel formability was found. It can be stated that the blank-holder force parameter is highly significant for the forming of this steel as the correct load can propitiate a considerable gain on material formability, i. e., allowing satisfactory production of parts with higher degree of complexity without risk of failure.

Keywords : Stamping. FLC curve . Blank-holder.

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

α	Razão de tensão
β	Razão de deformação
β'	Relação de embutimento
ε	Deformação verdadeira
ε_l	Deformação verdadeira na direção do comprimento
ε_t	Deformação verdadeira na direção da espessura
ε_w	Deformação verdadeira na direção da largura
ε_1	Deformação principal maior
ε_2	Deformação principal menor
ε_3	Deformação principal na direção da espessura
$\dot{\varepsilon}$	Taxa de deformação
μ	Coeficiente de atrito
σ	Tensão verdadeira
σ_1	Tensão principal na direção de maior deformação
σ_2	Tensão principal na direção de menos deformação
σ_3	Tensão principal na direção de espessura
σ_{rup}	Tensão de ruptura
A_{pc}	Área do prensa chapas
C	Coeficiente de severidade
D_0	Diâmetro inicial do <i>blank</i>
D_1	Diâmetro de punção
d_0	Diâmetro inicial
d_1	Diâmetro elipse eixo maior
d_2	Diâmetro elipse eixo menor
E	Módulo de elasticidade
F_{pc}	Força prensa chapas (ou força de sujeição)
l_o	Comprimento inicial

l_f	Comprimento final
m	Expoente de sensibilidade a taxa de deformação
n	Coeficiente de encruamento
P_{pc}	Pressão no prensa chapas (ou pressão de sujeição)
r	Coeficiente de anisotropia
\bar{r}	Coeficiente de anisotropia normal ou média
Δr	Coeficiente de anisotropia planar
r_{0°	Coeficiente de anisotropia na direção de laminação
r_{90°	Coeficiente de anisotropia a 90° da direção de laminação
r_{45°	Coeficiente de anisotropia a 45° da direção de laminação
r_d	Raio do ombro da matriz
t, t_e	Espessura da chapa
t_0	Espessura inicial
w_0	Largura inicial
w_f	Largura final
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Along, Al	Alongamento total
AHSS	Aços avançados de alta resistência
C	Carbono
CLC	Curva limite de conformação
CLP	Controlador lógico programável
CP	Corpo de prova
CPC	Carga no prensa-chapa
DLC	Diagrama limite de conformação
DL	Direção de laminação
DP	Aço bifásico
E	Módulo de elasticidade
EM	Estampagem Média
EP	Estampagem Profunda
EEP	Estampagem Extra-Profunda
EEP-PC	Estampagem Extra-Profunda peça crítica

EEP-IF	Estampagem Extra-Profunda Livre de Intersticial
HRB	Dureza Rockwell B
HSLA	Aços de alta resistência e baixa liga
I F	Aços livres de intersticiais
K	Coeficiente de resistência
LE	Tensão limite de escoamento
LR	Tensão limite de resistência à tração
MP	Matéria prima
MS	Aço martensítico
Ms	Início de transformação martensítica
NBR	Norma técnica brasileira
PE	Polietileno
QC	Qualidade comercial
TRIP	Aço de transformação induzida por plasticidade
V_1	Velocidade de embutimento
V_2	Velocidade de escoamento da chapa
UFPR	Universidade Federal do Paraná

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Operação de estiramento, mostrando a região de deformação e forma de ruptura	19
Figura 2 – Operação de embutimento profundo, mostrando a região de deformação e forma de ruptura	20
Figura 3 – Região qualquer de uma chapa plana (a) sem deformação; (b) deformada	21
Figura 4 – Diagrama das deformações principais representando os diferentes modos de deformação, correspondentes às diferentes razões de deformação	23
Figura 5 – Diagrama das tensões principais representando os diferentes modos de deformação, correspondentes às diferentes razões de tensão.....	24
Figura 6 – Estiramento equibiaxial em um <i>blank</i> estirado.....	25
Figura 7 – Deformação plana na parede lateral de um perfil longitudinal.....	26
Figura 8 – Tração uniaxial na aresta de um furo extrudado	26
Figura 9 – Embutimento no flange de um copo obtido por embutimento profundo.....	27
Figura 10 – Compressão uniaxial na extremidade do flange de um copo obtido por embutimento profundo.....	28
Figura 11 – Janela de conformação para um copo de paredes cônicas. Para a profundidade de 50 mm, a força do prensa-chapas deve estar entre 30 e 80 kN	30
Figura 12 – Curva esquemática da tensão verdadeira x deformação verdadeira para materiais com diferentes valores de n	34
Figura 13 – Representação das principais direções avaliadas para o cálculo da anisotropia planar.....	38
Figura 14 – Efeito do percentual de redução a frio na anisotropia normal para dois aços.....	39
Figura 15 – CLC para vários materiais metálicos	41
Figura 16 – CLC e a janela de conformação.....	42

Figura 17 - Ferramental utilizado por Altan et al (2007).....	44
Figura 18 – Variação provocada na curva limite de conformação para carga de 130 tf no prensa-chapas.....	44
Figura 19 - Variação provocada na curva limite de conformação para carga de 80 tf no prensa-chapas.....	45
Figura 20 - Variação provocada na curva limite de conformação para carga de 58 tf no prensa-chapas.....	46
Figura 21 – Corpos de prova de 200 x 200 mm e 150 x 200 mm estampados com as forças de 130tf (a), 80tf (b) e 58tf (c).....	47
Figura 22 – Variação da taxa de deformação no flange em função da força no prensa-chapas	47
Figura 23 –Variação da deformação maior em função da força no prensa-chapas.....	48
Figura 24 - Variação da taxa de deformação na flange em função da força do prensa-chapas	49
Figura 25 – Micrografia de um aço HSLA , aumento 400X, ataque nital 25%.....	52
Figura 26 - Relação entre ductilidade e resistência de várias categorias de aços amplamente utilizados na estrutura dos automóveis	53
Figura 27 - Desenho do corpo de prova para o ensaio de tração.....	56
Figura 28- Ferramental desenvolvido para execução dos ensaios de Nakazima: (a) desenho e (b) como fabricado (Gipiel,2012).....	58
Figura 29 - Desenho dos corpos de prova utilizados no ensaio de estampagem Nakazima para o levantamento da CLC.....	59
Figura 30 - Desenho dos corpos de prova usados nos ensaios de estampagem Nakazima para levantamento das CLC.....	60
Figura 31 – Elipses e círculos formados após a deformação do material.....	61
Figura 32 – Corpo de prova ilustrando os pontos de medição das deformações maior e menor, para levantamento da CLC	62
Figura 33 - Curva tensão-deformação de engenharia do aço HSLA440.....	65
Figura 34 - Curva tensão-deformação verdadeira do aço HSLA440.....	65
Figura 35 - Micrografia ótica do aço convencional alta resistência, HSLA440, atacada com Nital 3%	66

Figura 36 – DLC do aço HSLA440 obtida pelo ensaio Nakazima com 1002KN....	67
Figura 37 – DLC e CLC do aço HSLA440 obtida pelo ensaio Nakazima com CPC=1002 kN.....	67
Figura 38 – CLC do aço HSLA440 obtida pelo ensaio Nakazima com 1002 kN.....	68
Figura 39 – DLC do aço HSLA440 obtida pelo ensaio Nakazima com 401 kN.....	69
Figura 40 – DLC e CLC do aço HSLA440 obtida pelo ensaio Nakazima com FPC=401 kN.....	69
Figura 41 – CLC do aço HSLA440 obtida pelo ensaio Nakazima com 401 kN.....	70
Figura 42 – DLC do aço HSLA440 obtida pelo ensaio Nakazima com 300,6 Kn..	70
Figura 43 – DLC e CLC do aço HSLA440 obtida pelo ensaio Nakazima com FPC=300,6kN.....	71
Figura 44 – CLC do aço HSLA440 obtida pelo ensaio Nakazima com 300,6 kN.....	71
Figura 45 – Comparação entre as curvas limites de conformação obtidas pelo ensaio Nakazima para forças no prensa-chapas de 1002,401 e 300,6 KN.....	72
Figura 46 – Variação da taxa de deformação no flange em função da força no prensa-chapas.....	74
Figura 47 – Variação da taxa de deformação no flange em função da força no prensa-chapas, com as forças de 2212,64 kN e 706,07 kN.....	75

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Efeito da adição de elementos de liga nas propriedades de um aço ARBL.....	51
Tabela 2 – Quantidade de corpos de prova necessários no ensaio de tração para levantamento das propriedades n , R , LR , LE , Al	56
Tabela 3 – Quantidade de corpos de prova necessários para o ensaio de estampagem.....	60
Tabela 4 – Corpos de prova para ensaios de estampagem com o aço HSLA440, variando a força no prensa-chapa e dimensão do corpo de prova.....	63
Tabela 5 – Propriedades mecânicas e espessura do aço HSLA440.....	64
Tabela 6 – Coeficientes de encruamento.....	64
Tabela 7 – Coeficientes de anisotropia plástica do material.....	64
Tabela 8 – Composição química do aço HSLA440 em (%).....	66
Tabela 9 – Tempo de estampagem, deslocamento da chapa e velocidade de escoamento da chapa no flange para diferentes cargas no prensa-chapas.....	73

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	16
2 OBJETIVOS.....	17
2.1 OBJETIVOS GEERAIS.....	17
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1 PROCESSO DE ESTAMPAGEM.....	18
3.2 OPERAÇÕES DE ESTAMPAGEM.....	18
3.2.1 Esttiremento.....	18
3.2.2 Embutimento.....	19
3.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO DA CHAPA NA ESTAMPAGEM.....	20
3.4 MODOS DE DEFORMAÇÃO.....	22
3.4.1 Estiramento Equibiaxial, $\beta = 1$ e $\alpha = 1$	24
3.4.2 Deformação Plana $\beta = 0$ e $\alpha = \frac{1}{2}$	25
3.4.3 Tração Uniaxial, $\beta = \frac{1}{2}$ e $\alpha = 0$	26
3.4.4 Embutimento, $\beta = -1$ e $\alpha = -1$	27
3.4.5 Compressão Uniaxial, $\beta = -2$ e $\alpha = -\infty$	27
3.5 ESTAMPABILIDADE.....	28
3.6 FORÇA DE SUJEIÇÃO (PRENSA-CHAPAS).....	29
3.7 AVALIAÇÃO DA ESTAMPABILIDADES DAS CHAPAS ATRAVÉS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	31
3.7.1 Dureza, limite de escoamento, limite de resistência e alongamento.....	32
3.7.2 Coeficiente de encruamento (n).....	33
3.7.3 Expoente de sensibilidade a taxa de deformação (n).....	35
3.7.4 Coeficiente de anisotropia (r).....	36
3.8 ENSAIOS SIMULATIVOS.....	40
3.9 CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO (CLC).....	40
3.10 FATORES QUE INFLUENCIAM A CLC	43

3.10.1 Força no prensa-chapa.....	43
4 AÇOS USADOS EM ESTAMPAGEM.....	50
4.1 AÇOS CONVENCIONAIS DE BAIXA RESISTÊNCIA.....	50
4.2 AÇOS CONVENCIONAIS DE ALTA RESISTÊNCIA.....	50
4.3 AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA (ARBL).....	50
5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	54
5.1 INTRODUÇÃO.....	54
5.2 MATERIAIS UTILIZADOS.....	54
5.3 ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	55
5.3.1 Composição química.....	55
5.3.2 Ensaios metalográficos.....	55
5.3.3 Ensaios de tração.....	55
5.3.4 Ensaio de estampagem Nakazima.....	58
5.3.5 Ensaio para análise da influência da carga no prensa-chapas.....	62
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	63
6.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL.....	63
6.1.1 Propriedades mecânicas.....	63
6.1.2 Composição química e metalografia.....	65
6.1.3 Ensaio de estampagem para levantamento da CLC.....	66
6.1.4 Influência da carga do prensa-chapas na CLC.....	68
7 CONCLUSÃO.....	77
7.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL.....	77
7.2 INFLUÊNCIA DA FORÇA DO PRENSA-CHAPAS.....	77
8 SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	78
REFERÊNCIAS.....	79

1 INTRODUÇÃO

A demanda nos últimos anos por automóveis mais seguros, econômicos, menos poluentes e com preços competitivos exigiram que os fabricantes, tanto montadoras quanto indústrias siderúrgicas e a comunidade científica, fizessem grandes investimentos na pesquisa de novos aços. Com isso à partir dos anos 1990 surgiram os Aços de Alta Resistência e Baixa Liga - ARBL (*High Strength Low Alloy* – HSLA) contendo microadições de Nb, Ti e V, microestrutura ferrítica-perlítica mais refinada e capacidade de endurecimento por precipitação que lhe proporcionam maior resistência mecânica. O ganho em resistência, porém, comprometeu a sua ductilidade com uma ligeira perda da sua estampabilidade. Assim a indústria siderúrgica foi desenvolvendo novos tipos de chapas de aço com características cada vez mais adequadas às aplicações específicas.

À partir da década de 1990 todos esses novos aços foram englobados numa só família designada como Aços Avançados de Alta Resistência (*Advanced High Strength Steels* – AHSS). A redução da estampabilidade desses aços, decorrente do aumento da sua resistência mecânica, foi compensada com o uso de microestruturas adequadas que permitem minimizar a perda de ductilidade sob maiores níveis de resistência mecânica.

A otimização do processo de estampagem requer um profundo conhecimento da conformabilidade de chapas metálicas para a produção de peças estampadas de qualidade. Vários parâmetros influem na conformabilidade do material, desde o projeto e ajuste do ferramental, lubrificante e outros. O conhecimento da influência desses parâmetros na conformabilidade dos materiais auxilia a otimização do processo de estampagem, permitindo assim a obtenção de peças mais complexas e de melhor qualidade. Portanto, procura-se cada vez mais, pesquisar a influência dos parâmetros envolvidos no processo de estampagem auxiliando as indústrias conhecer melhor estas variáveis e entender melhor a estampabilidade das chapas metálicas utilizadas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem por objetivo analisar a influência da força no prensa-chapas na estampabilidade do aço HSLA440 de alta resistência quando submetidos ao teste de estampagem Nakazima.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar a caracterização experimental do aço HSLA440, a fim de se conhecer de forma precisa as características de conformabilidade deste aço de alta resistência.
2. Utilização de um equipamento adequado para a realização do ensaio de estampagem Nakazima, permitindo a variação da força do prensa-chapas durante a operação de estampagem das amostras.
3. Verificação do efeito da força do prensa-chapas na estampabilidade do aço HSLA440, através da curva limite de conformação .
4. Organização dos resultados mostrando o efeito da força do prensa-chapas na estampagem desse aço, que auxilie, em termos práticos, numa melhor condição de ajuste e dimensionamento deste componente do ferramental.
5. Geração de dados experimentais que possam ser utilizados no desenvolvimento e aprimoramento de modelos numéricos para simulação de operações de estampagem.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O PROCESSO DE ESTAMPAGEM

O processo de estampagem, ou conformação de chapas planas, teve origem no século 18, quando se desenvolveu um método de fabricação de copos e painéis em larga escala e com custos mais baixos que os métodos artesanais, utilizando-se o princípio de moldes machos e fêmeas. Desde então, vem evoluindo continuamente, existindo hoje fábricas automatizadas produzindo peças de elevada complexidade e em série. No entanto, o seu desenvolvimento continua sendo um grande desafio, para técnicos e engenheiros (Tigrinho, 2005). O processo de estampagem pode ser simples, como o realizado através de uma única operação de dobra, ou uma sequência de operações complexas como, por exemplo, na fabricação de painéis externos de automóveis.

3.2 OPERAÇÕES DE ESTAMPAGEM

As operações de estampagem são bastante diversas e impactadas por vários fatores, de modo que testes simples não conseguem fornecer indicações precisas a respeito da estampabilidade das chapas. Existem muitas operações complexas de estampagem, porém todas consistem de combinações ou sequências das operações básicas de corte, dobramento, estiramento, embutimento e cunhagem (*Metals Handbook* ASM, 1993). As operações de corte, dobramento e cunhagem não são o objetivo deste estudo e por este motivo não serão abordados neste trabalho.

3.2.1 Estiramento

O estiramento cria formas ou cavidades em chapas metálicas, de modo que a área superficial aumenta e conseqüentemente, pela conservação de massa, a espessura do material é reduzida, conforme desenho esquemático da Figura 1.

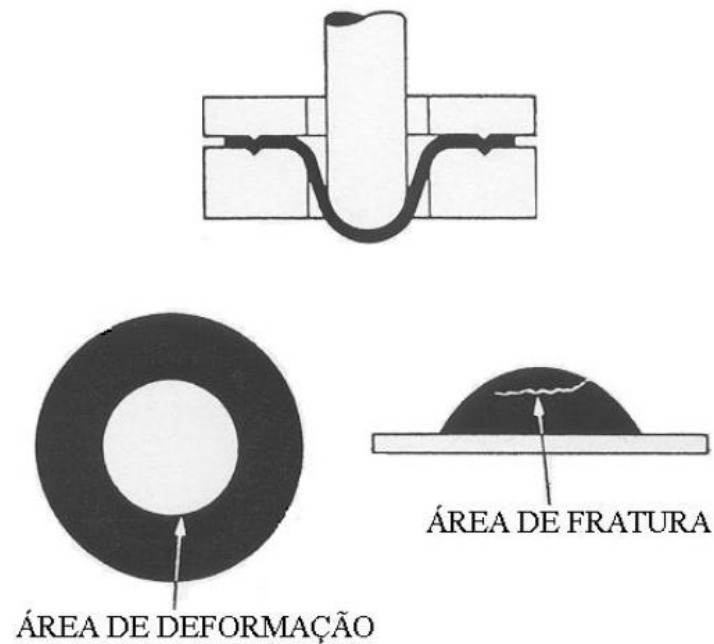


Figura 1 - Operação de estiramento, mostrando a região de deformação e forma de ruptura

Fonte Keeler, 1968.

3.2.2 Embutimento

Embutimento é a operação de estampagem que ocorre sob forças de compressão e tração, no qual não se deseja o afinamento da parede. O exemplo mais simples é a estampagem de um copo cilíndrico como o da Figura 2. O embutimento é realizado por meio de um punção, uma matriz e um prensa chapas para evitar que haja enrugamento no flange quando o material está fluindo para dentro da matriz pela ação do punção. Também a relação entre as forças exercidas pelo punção e pelo prensa chapas é muito importante na formação de rugas. A lubrificação também é importante, já que a chapa deve deslizar entre a matriz e o prensa-chapas. O estiramento sob o punção é pequeno e grande parte da deformação está no flange. Como esta ocorre sobre tensões de compressão, grandes deformações podem ser obtidas e é possível conformar um copo com a altura igual ou até ligeiramente maior que o diâmetro do mesmo (*Metal Forming Handbook* Schuler , 1998 e *Metals Handbook* ASM, 1993).

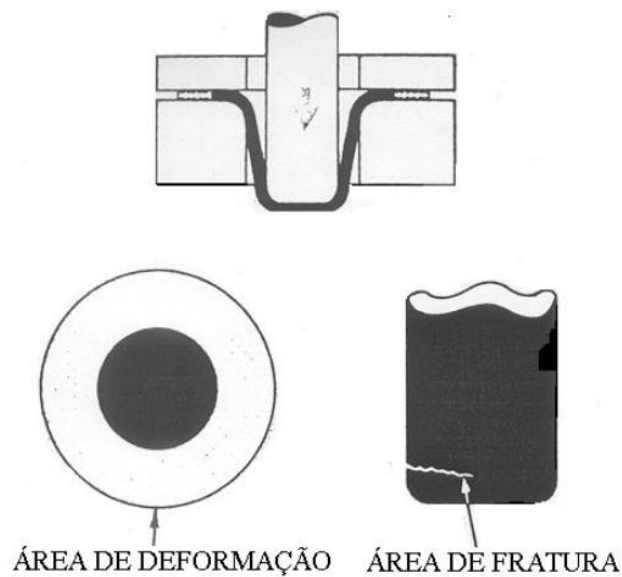


Figura 2 - Operação de embutimento profundo, mostrando a região deformação e forma de ruptura
 Fonte Keeler, 1968

3.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO DA ESTAMPAGEM

Como o objetivo deste estudo é a avaliação do processo de estampagem de peças obtidas principalmente através das operações de embutimento e estiramento, o estudo do comportamento mecânico da chapa será direcionado para estas duas operações. Para melhor explicar o comportamento mecânico das chapas durante o embutimento e o estiramento, pode-se considerar uma região qualquer de uma chapa plana, inicialmente de espessura t_0 , e marcada com uma rede de círculos de diâmetro d_0 , conforme mostrado na Figura 3(a). Após a deformação desta chapa pela ação das tensões principais σ_1 e σ_2 , os círculos irão deformar-se em elipses de eixo maior e menor d_1 e d_2 , respectivamente, conforme mostrado na Figura 3(b) (Marciniak, 2002 ; Bastos, 2009).

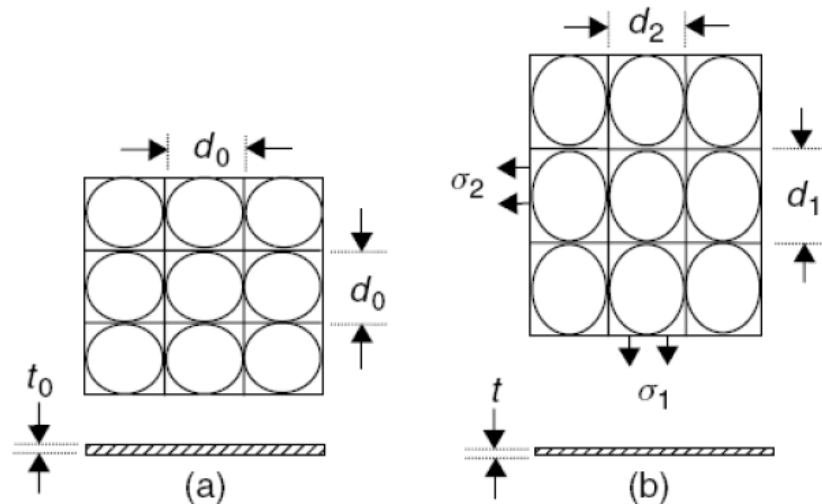


Figura 3 - Região qualquer de uma chapa plana (a) sem deformação; (b) deformada

Fonte Marciniak, 2002

Portanto, as tensões normais são:

$$\sigma_1 \quad \sigma_2 = \alpha_{\sigma 1} \quad \sigma_3 = 0 \quad (1)$$

Onde:

σ_1 Tensão principal na direção de maior deformação

σ_2 Tensão principal na direção de menos deformação

σ_3 Tensão principal na direção de espessura

Uma característica comum ao embutimento e estiramento, é que a tensão perpendicular à superfície da mesma, σ_3 , é muito pequena em comparação com as tensões presentes no plano da chapa, σ_1 e σ_2 , devido à pressão de contato entre a chapa e o ferramental de estampagem ser muito menor que o limite de escoamento do material. Portanto, pode-se assumir que esta tensão normal é igual a zero e tem-se então um estado plano de tensões (Marciniak, 2002).

Já as deformações principais desenvolvidas são:

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{d_1}{d_0} ; \quad \varepsilon_2 = \ln \frac{d_2}{d_0} ; \quad \varepsilon_3 = \ln \frac{d_3}{d_0} \quad (2)$$

Onde:

ε_1 Deformação principal maior

ε_2 Deformação principal menor

ε_3	Deformação principal na direção da espessura
d_0	Diâmetro inicial
d_1	Diâmetro elipse eixo maior
d_2	Diâmetro elipse eixo menor

Sendo que estas também podem ser descritas em termos da razão de deformação β :

$$\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2 = \beta \varepsilon_1 \quad \varepsilon_3 = - (1 + \beta) \varepsilon_1 \quad (3)$$

Onde:

β Razão de deformação

3.4 MODOS DE DEFORMAÇÃO

O diagrama das deformações principais mostrado na Figura 4 não representa nenhum processo em particular, e sim, os modos de deformação os quais uma chapa, sob o estado plano de tensões, estaria submetida. A elipse representa o contorno de igual deformação efetiva, ou seja, um elemento com a tensão de escoamento conhecida, que se deformado sobre diversos caminhos de deformação (várias combinações de $\varepsilon_1 \times \varepsilon_2$), percorrerá a trajetória de uma elipse. Para os modos de deformação onde $\beta > -1$ a chapa tem sua espessura reduzida e para $\beta < -1$ a espessura é aumentada (Bastos, 2009)

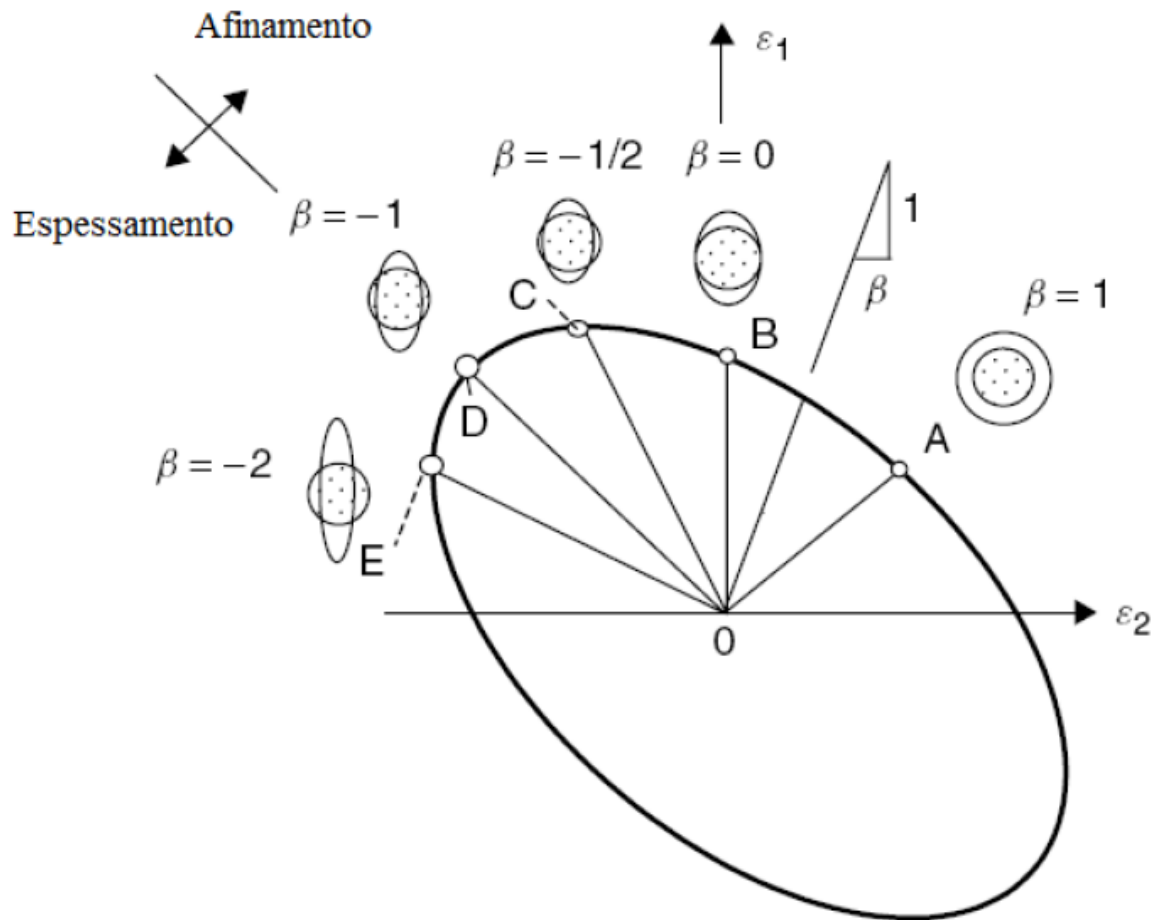


Figura 4 – Diagrama das deformações principais representando os diferentes modos de deformação, correspondentes às diferentes razões de deformação

Fonte Marciniak, 2002

Por analogia, pode-se representar os modos básicos de deformação num diagrama de tensões principais envolvidas no processo, figura 5, sendo este também bastante útil no entendimento das forças envolvidas no embutimento e estiramento. Por convenção, a tensão principal e a deformação principal na direção 1 (σ_1 e σ_2), sempre serão as tracionadas maiores ou “mais positivas”. Por esta razão, todos os caminhos de deformação possíveis nos processos de conformação de chapas restringem-se ao vértice projetado OA e OE. Portanto a razão de deformação varia na faixa $-2 \leq \beta \leq 1$ e a razão de tensão varia na faixa de $-\infty \leq \alpha \leq 1$ (Bastos, 2009) .

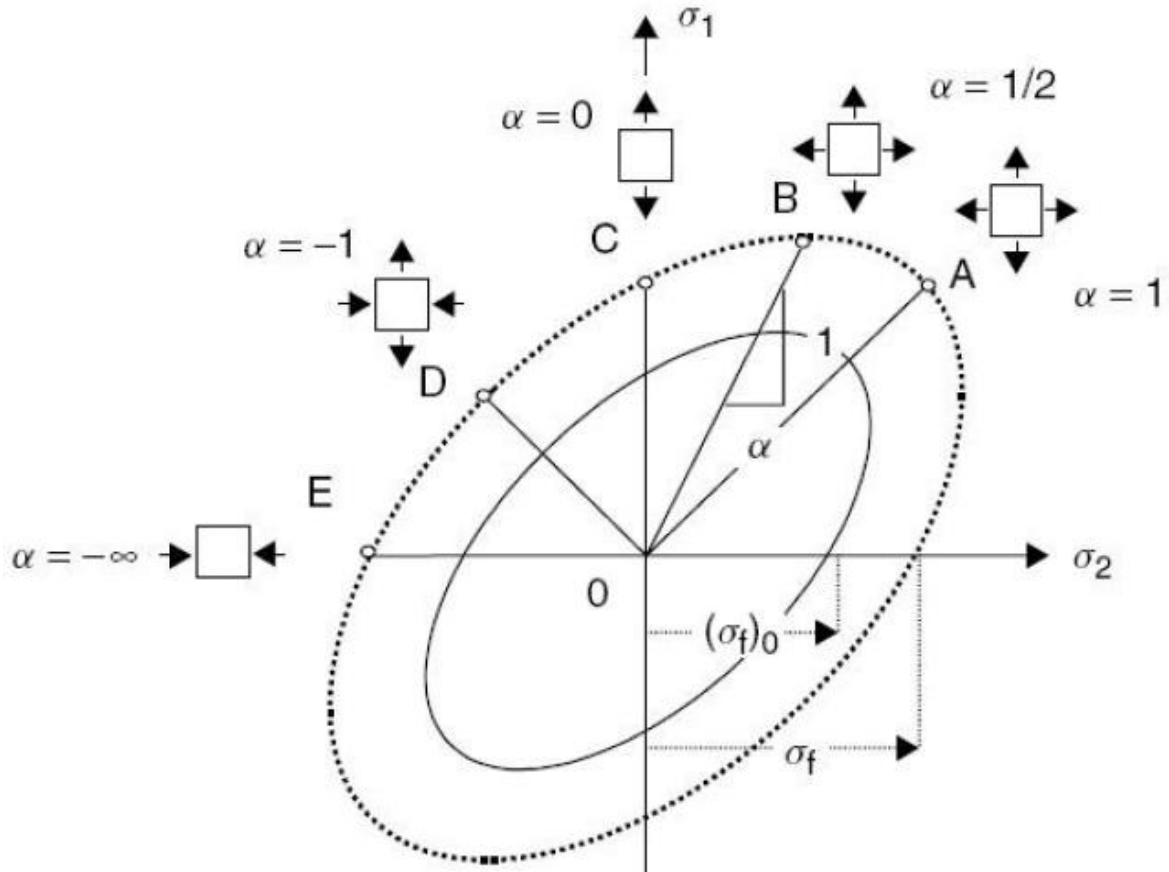


Figura 5 – Diagrama das tensões principais representando os diferentes modos de deformação, correspondentes às diferentes razões de tensão

Fonte: Marciniak, 2002

Os modos de deformação que podem ser encontrados numa chapa sobre estado plano de tensões são: estiramento equibiaxial, deformação plana, tração uniaxial, embutimento e compressão uniaxial, conforme mostrados a seguir.

3.4.1 Estiramento Equibiaxial, $\beta = 1$ e $\alpha = 1$

O estiramento equibiaxial é representado pelo caminho OA das Figuras 4 e 5. A chapa estirada sobre um punção hemisférico irá deformar na região central como mostrado na Figura 6. As tensões e deformações no plano são iguais nas duas direções, $\sigma_2 = \sigma_1$ e $\varepsilon_2 = \varepsilon_1$, e a grade de círculos se expande, porém permanece circular. Para $\beta = 1$, a partir da equação 3, tem-se que a deformação na direção da espessura é duas vezes maior que na direção principal, $\varepsilon_3 = -2\varepsilon_1$. Este é o modo de deformação no qual a espessura é reduzida mais rapidamente em relação à

deformação principal ε_1 , pois a deformação é homogênea em todas as direções, o que torna a estrição mais difusa (Marciniak, 2002; Xua et al, 2000; Xu et al, 1998; Mielnik, 1991; Rocha, 2003; Bastos, 2009).

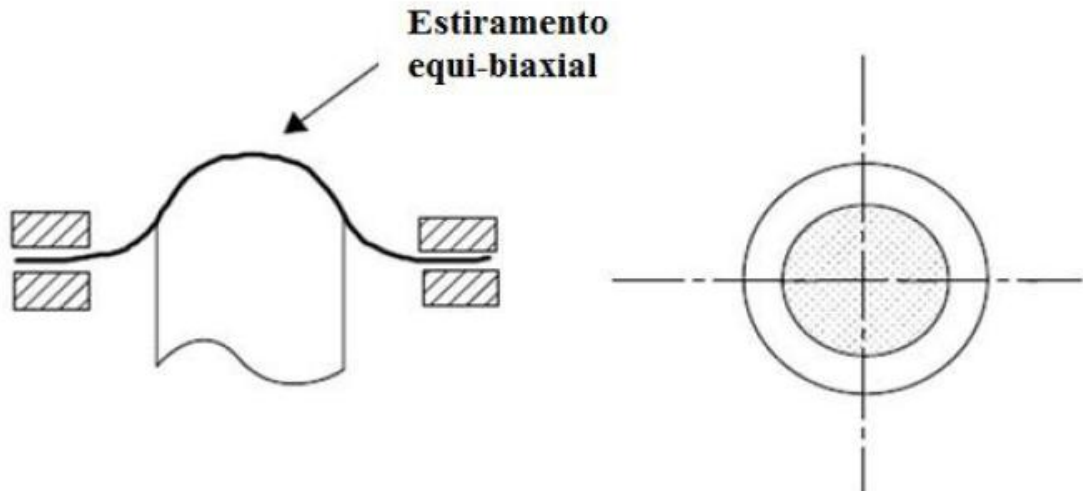


Figura 6 – Estiramento equibiaxial em um *blank* estirado

Fonte Marciniak, 2002

3.4.2 Deformação Plana $\beta = 0$ e $\alpha = \frac{1}{2}$

Neste modo de deformação, ilustrado pelo caminho OB das Figuras 4 e 5, a chapa se deforma apenas em uma direção e os círculos das grades se tornam elipses, nas quais o eixo menor não é alterado. Como $\beta = 0$ tem-se que $\varepsilon_2 = 0$ e $\varepsilon_3 = -\varepsilon_1$, e ainda, como $\alpha = 1/2$ tem-se $\sigma_2 = \frac{\sigma_1}{2}$. A magnitude da tensão principal σ_1 é maior neste modo de deformação do que em qualquer outro. Em peças longas, este modo de deformação é facilmente observado nas laterais conforme mostrado na Figura 7. Particularmente na deformação plana, a chapa está mais susceptível a fraturar, devido ao aparecimento de estrições localizadas (Marciniak, 2002; Rocha, 2000; Bastos, 2009).

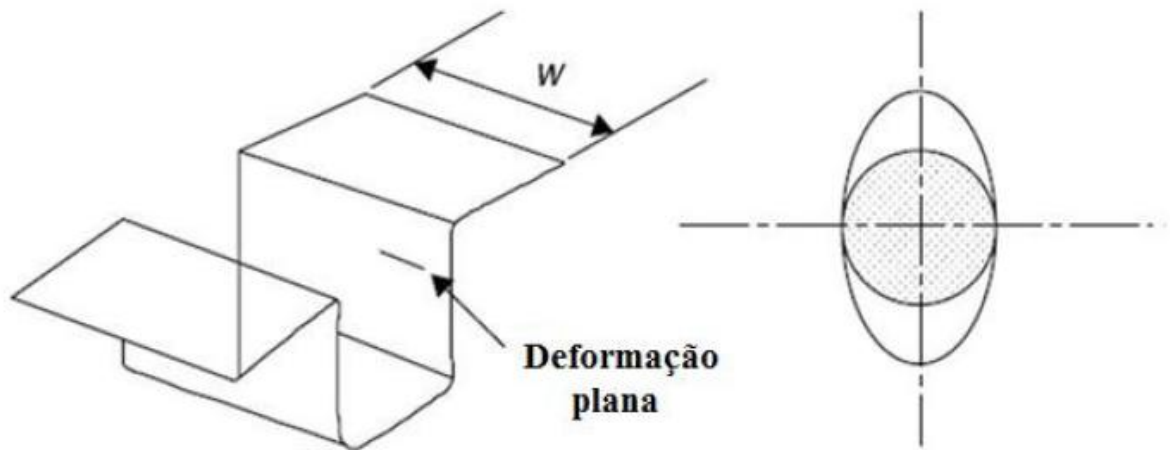


Figura 7 – Deformação plana na parede lateral de um perfil longitudinal

Fonte Marciniak, 2002

3.4.3 Tração Uniaxial, $\beta = -\frac{1}{2}$ e $\alpha = 0$

O caminho OC, das Figuras 4 e 5, representa o modo de deformação tração uniaxial, que é equivalente ao ensaio de tração, pois a menor tensão principal é igual a zero, $\sigma_2 = 0$. Como $\beta = -1/2$ tem-se que $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\frac{\varepsilon_1}{2}$ e ainda, como $\alpha = 0$ tem-se que $\sigma_2 = 0$. Portanto, a chapa estira-se na direção principal 1 e se contrai na direção principal 2 e na espessura. Nas operações de estampagem, este modo de deformação irá ocorrer toda vez que uma aresta livre é estirada, como no caso da extrusão de um furo (Bastos, 2009), ilustrado na Figura 8.

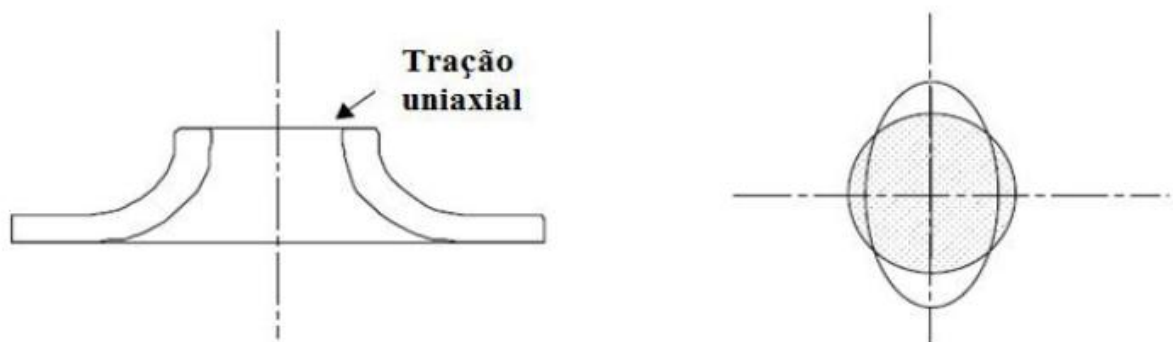


Figura 8 – Tração uniaxial na aresta de um furo extrudado

Fonte Marciniak, 2002

3.4.4 Embutimento, $\beta = -1$ e $\alpha = -1$

Neste modo de deformação, caminho OD, as tensões e deformações são iguais, porém opostas e a chapa deforma sem que a espessura seja alterada. Como $\beta = -1$ e $\alpha = -1$, tem-se que $\varepsilon_2 = -\varepsilon_1$, $\varepsilon_3 = 0$ e $\sigma_2 = -\sigma_1$. É chamado de embutimento, pois é o modo de deformação predominante no flange de um copo obtido por embutimento profundo quando a chapa é puxada para dentro da região convergente, ilustrado na Figura 9. A ocorrência de rupturas é improvável e na prática, grandes deformações são encontradas com frequência neste modo, apesar da magnitude das tensões principais serem as menores dentre todos os modos de deformação. Esta magnitude é da ordem de 58% da tensão requerida para iniciar o escoamento se comparado com um elemento sobre tração uniaxial. Por estas razões, este pode ser considerado o modo de deformação ideal (Bastos, 2009).

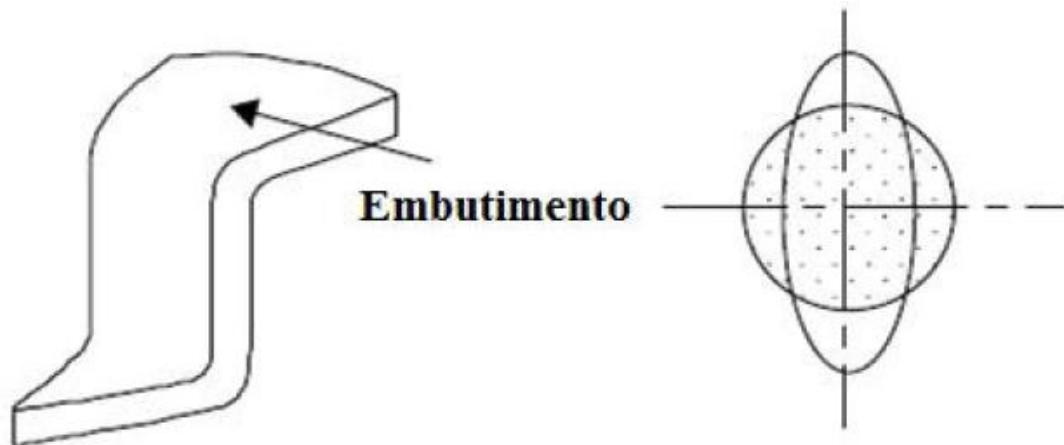


Figura 9 – Embutimento no flange de um copo obtido por embutimento profundo

Fonte Marciniak, 2002

3.4.5 Compressão Uniaxial, $\beta = -2$ e $\alpha = -\infty$

Indicado pelo caminho OE, este modo ocorre quando a maior tensão é zero, $\sigma_1 = 0$, como nas arestas do flange de um copo obtido por embutimento profundo, ilustrado na Figura 10. A menor tensão é compressiva e igual à tensão de escoamento, $\sigma_2 = -\sigma_e$. Neste modo de deformação, a chapa aumenta sua espessura e provavelmente ocorrerá enrugamento (Bastos, 2009).

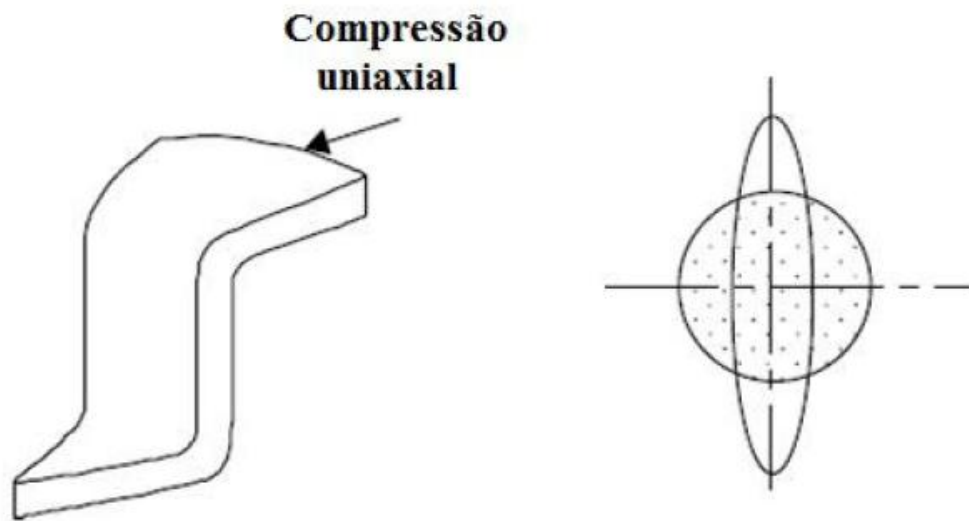


Figura 10 – Compressão uniaxial na extremidade do flange de um copo obtido por embutimento profundo

Fonte Marciniak, 2002

3.5 ESTAMPABILIDADE

A estampabilidade de uma chapa metálica é a sua capacidade de se deformar, adquirindo a forma imposta pelos esforços gerados por uma matriz e por um punção, sem que ocorra ruptura durante a conformação ou aparecimento de outros defeitos que inviabilizem a utilização da peça (Hosford, 2007; Semiatin, 1984; Mielnik, 1991). As operações para estampagem de chapas são tão diversas que testes simples não fornecem uma indicação precisa sobre a estampabilidade de um material que seja válida em diferentes aplicações. Não há um índice simples e direto para a medição da estampabilidade de um material que seja válido e aplicável a diversas situações, uma vez que um determinado material que atendeu perfeitamente ao projeto de uma determinada peça pode falhar quando da realização de outra peça. Portanto, a estampabilidade é uma função do material e das características de processo. O conhecimento das propriedades do material e a análise das variáveis do processo são indispensáveis na determinação da probabilidade de sucesso na produção de peças estampadas e no desenvolvimento de processos mais eficientes (Taylor, 1988; Boyles, 1982). A seguir serão mostrados os efeitos de alguns parâmetros de

processo na estampabilidade e a avaliação da estampabilidade das chapas através de ensaios mecânicos e ensaios simulativos.

3.6 FORÇA DE SUJEIÇÃO (PRENSA-CHAPAS)

As tensões tangenciais de compressão que atuam na região do flange das peças submetidas ao embutimento ocasionam o enrugamento das extremidades deste flange. A fim de controlar esse enrugamento, é utilizado um prensa-chapa para exercer pressão (Lange, 1993) e controlar o fluxo de material que se deforma para dentro da matriz. A força do prensa-chapa (sujeição), F_{pc} , é dada por:

$$F_{pc} = A_{pc} \cdot P_{pc} \quad (4)$$

Onde:

F_{pc} Força prensa chapas (ou força de sujeição)

P_{pc} Pressão no prensa chapas (ou pressão de sujeição)

A_{pc} Área do prensa chapas

Sibel e Beisswänger (Lange, 1993) propõem que a pressão necessária do prensa-chapa pode ser calculada através da equação 5.

$$P_{pc} = 10^{-3} \cdot C \cdot \left[(\beta' - 1)^3 + \frac{0,005 \cdot d_0}{t_0} \right] \cdot \sigma_{rup} \quad (5)$$

Onde:

C Coeficiente de severidade

β' Relação de embutimento

d_0 Diâmetro inicial

t_0 Espessura inicial

σ_{rup} Tensão de ruptura

$$\beta' = \frac{D_0}{D_1} \quad (6)$$

Onde:

D_0 Diâmetro inicial do *blank*

D_1 Diâmetro do punção

Para cada material e profundidade de embutimento desejada, existe uma “janela” de conformação com valores de trabalho para a força do prensa-chapas. Se esta força for muito baixa ocorrerá enrugamento, por outro lado, se for muito alta haverá falha na parede do copo, conforme mostrado na Figura 11. Por esta razão a força do prensa-chapas precisa ser controlada. Pode-se ainda alterar esta força durante a operação, possibilitando atingir maiores profundidades de embutimento se a força do prensa-chapas começar num nível mais baixo e aumentar gradativamente até o fim do processo (Hosford, 2007; Bastos, 2008).

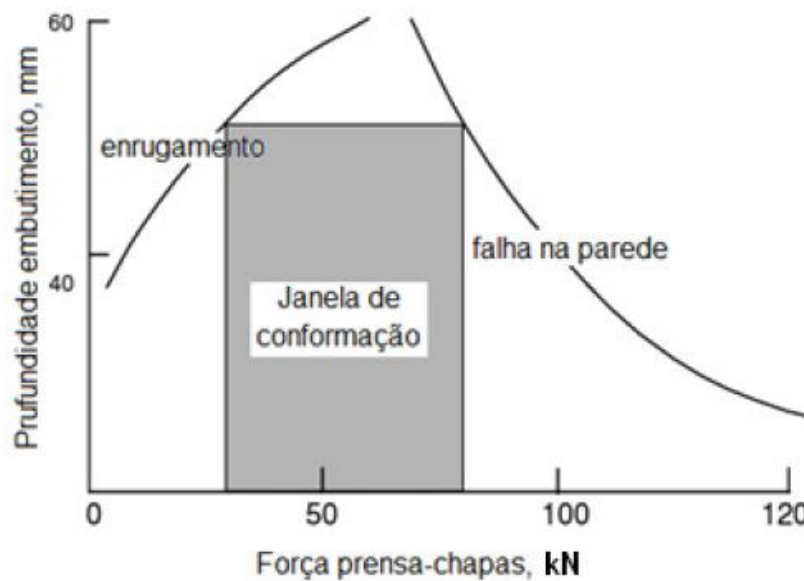


Figura 11 – Janela de conformação para um copo de paredes cônicas. Para a profundidade de 50 mm, a força do prensa chapas deve estar entre 30 e 80 Kn

Fonte adaptado de Hosford, 2007

3.7 AVALIAÇÃO DA ESTAMPABILIDADE DAS CHAPAS ATRAVÉS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Para uma boa estampabilidade numa extensa faixa de aplicações, o material deveria:

1. Distribuir uniformemente a deformação.
2. Atingir altos níveis de deformação sem estricção ou fratura.
3. Resistir a tensões compressivas planares sem enrugar.
4. Resistir a tensões cisalhantes planares sem fraturar.
5. Manter a forma da peça ao ser removida da matriz.
6. Manter uma superfície lisa e resistir a danos superficiais.

Três propriedades mecânicas são determinantes na distribuição da deformação nas operações de conformação:

1. O coeficiente de encruamento (n)
2. O coeficiente de anisotropia (r)
3. Expoente de sensibilidade à taxa de deformação (m)

A capacidade de distribuir a deformação uniformemente depende do coeficiente de encruamento e do expoente de sensibilidade à taxa de deformação. A capacidade de alcançar altos níveis de deformação depende de fatores como composição química, estado de encruamento, coeficiente de encruamento, coeficiente de anisotropia, expoente de sensibilidade à taxa de deformação, espessura, força de sujeição, homogeneidade e isenção de defeitos e inclusões (Bastos, 2009). Altos valores do coeficiente de encruamento e do expoente de sensibilidade à taxa de deformação conduzem a uma boa estampabilidade nas operações de estiramento, mas tem pouco efeito no embutimento. Numa operação de embutimento o material do flange deve fluir para dentro da matriz sem que ocorra fratura nas paredes laterais. Neste caso, altos valores do coeficiente de encruamento e expoente de sensibilidade à taxa de deformação aumentam a resistência destas paredes, o que é benéfico. Por outro lado a resistência do flange também aumenta, dificultando o modo de deformação de embutimento. Já as propriedades mecânicas utilizadas atualmente (limite de escoamento, limite de

resistência, alongamento e dureza) têm uma relação indireta com o estiramento ou embutimento (Keeler, 2003 ; Bastos, 2009).

3.7.1 Dureza, limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR) e alongamento

A dureza tem sido utilizada em muitas estamparias como medida de estampabilidade, monitorando as mudanças em uma classe particular de material, causadas por alterações no seu processamento. As medidas de dureza se correlacionam bem com os valores do limite de resistência (Kasper et al, 1976), e por esta razão o ensaio de dureza é útil no controle de qualidade, para assegurar que o material utilizado é da classe especificada e tem o nível adequado de dureza (*Metals Handbook ASM*, 1993). No entanto, as medidas de dureza são sensíveis às condições superficiais da chapa, à planicidade do corpo de prova e aos procedimentos de ensaio. Além disso, são muito afetadas pela quantidade de trabalho a frio perto da superfície do material, no passe de encruamento, por exemplo, de modo que um material macio pode apresentar picos de dureza elevada.

Outras propriedades mecânicas influenciam a estampabilidade de chapas mais do que a dureza, de modo que valores de dureza, somente, não devem ser considerados como base para rejeição de chapas (Al-Qureshi, 2003). Outra propriedade, o limite de escoamento (LE), é comumente correlacionada com a estampabilidade, porém, tal qual a dureza, esta correlação só pode ser considerada válida quando se comparam aços de uma mesma classe (Bastos, 2008).

A tensão de escoamento meramente indica a tensão onde se inicia a deformação plástica e não indica a quantidade de deformação plástica permissível antes da estricção. Um exemplo é comparar o aço baixo carbono com o aço inoxidável. A tensão de escoamento do aço inoxidável pode ser o dobro do aço baixo carbono, mas a estampabilidade é geralmente melhor (Souza, 1974; Srour, 2002). O limite de escoamento ainda tem a desvantagem de ser sensível à velocidade de deformação. Ele aumenta com o aumento da velocidade de deformação. Enquanto os testes conduzidos em laboratório ocorrem em baixas velocidades, nas estamparias as velocidades utilizadas são maiores, para aumentar a produtividade. O mesmo ocorre com o limite de resistência, porém em menor intensidade.

O limite de resistência (LR), por ser uma propriedade bem determinante, é especificado sempre com as outras propriedades mecânicas dos metais e ligas. O limite de resistência é influenciado pela anisotropia de metais trabalhados mecanicamente, se bem que em menor grau, comparativamente, ao limite de escoamento. A razão LR/LE é definida como sendo o quociente entre o limite de resistência e o limite de escoamento, e também é utilizada como um índice para a estampabilidade nas indústrias. Este índice pode ser interpretado como uma medida para a ductilidade, desde que a comparação seja entre aços de um mesmo grupo.

Outra relação, segundo Havranek (1976), pode ser considerada como parâmetro para comparação de estampabilidade, a relação entre o limite resistência e o módulo de elasticidade (LR/E). Quanto menor, menor será a possibilidade de ocorrência do enrugamento. Há ainda o alongamento total, que inclui tanto a parte uniforme, antes da estricção, quanto a parte não uniforme, aquela observada após estricção localizada no corpo de prova do ensaio de tração. Como o aparecimento de estricções em peças submetidas a operações de estampagem é frequentemente motivo de rejeição das peças, não é recomendado utilizar o alongamento total como índice de estampabilidade (Gorni, 2004; Bastos, 2009).

3.7.2 Coeficiente de encruamento (n)

O coeficiente de encruamento, n , fornece uma medida da capacidade do material distribuir a deformação durante a estampagem na presença de um gradiente de tensões. Apesar de, geralmente, os estados combinados de tensão estarem envolvidos nos processos de conformação, tal coeficiente constitui um parâmetro útil para prever o comportamento da chapa metálica no que se refere à formação de um pescoço difuso, altos valores de n , ou localizado, baixos valores de n (Rocha, 2006). A região de deformação plástica uniforme da curva tensão verdadeira, σ , versus deformação verdadeira, ε , obtida em ensaios de tração em aços de baixo carbono para estampagem, é razoavelmente descrita pela equação 7 de Hollomon (Mielnik, 1991; Bastos, 2009).

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n \quad (7)$$

Onde:

σ Tensão verdadeira

K Coeficiente de resistência

ε Deformação verdadeira

n Coeficiente de encruamento

Em materiais com um alto valor de n , quando comparados com materiais de menor valor de n , a tensão de escoamento cresce rapidamente com a deformação, distribuindo as deformações subsequentes para regiões de mais baixa tensão de escoamento, homogeneizando as deformações, como ilustrado pela Figura 12. Um metal com um alto valor de n tende a deformar-se mais uniformemente, até mesmo sobre tensões não uniformes. Assim, para um bom estiramento, um alto expoente de encruamento, n , é desejável. O valor de n também tem efeito indireto no enrugamento que ocorre nas operações de embutimento. Valores de n elevados permitem aumentar a força no prensa chapas, o que reduz o enrugamento (Bastos, 2009).

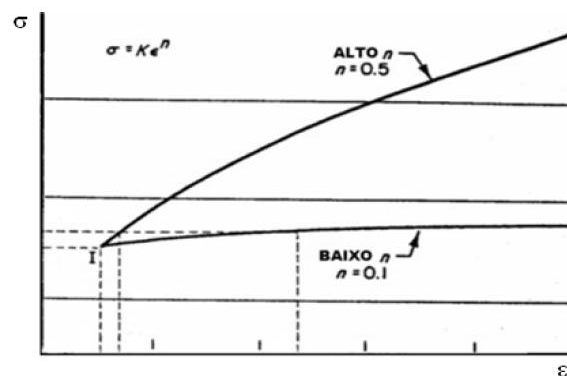


Figura 12 – Curva esquemática da tensão verdadeira x deformação verdadeira para materiais com diferentes valores de n

Fonte Keeler, 2003

É importante destacar que o coeficiente de encruamento, embora seja considerado uma constante do material, depende da história termomecânica do mesmo, ou seja, n é dependente da microestrutura do material. Valores típicos de n para aços baixo carbono destinados à estampagem com limite de escoamento

menor que 345 MPa estão entre 0,16 e 0,26 (Ferreira Filho *et al*, 2005). Já para os aços de alta resistência, os valores de n podem ser estimados pela Equação 8 (Backofen, 1974).

$$n = \frac{70}{LE} \quad (8)$$

Onde:

n Coeficiente de encruamento

LE Tensão limite de escoamento

3.7.3 Expoente de sensibilidade à taxa de deformação (m)

Outro parâmetro importante nas operações de conformação é o expoente de sensibilidade à taxa de deformação, m , o qual é uma medida do comportamento da tensão quando ocorrem mudanças incrementais na taxa de deformação. A equação de Norton-Hoff é utilizada para o endurecimento com a taxa de deformação (Hosford, 2007):

$$\sigma = c \cdot \varepsilon^m \quad (9)$$

Onde:

σ Tensão verdadeira

c Coeficiente de severidade

ε Deformação verdadeira

m Expoente de sensibilidade à taxa de deformação

O valor de m influencia a distribuição de deformações de uma maneira similar ao valor de n . Um valor de m positivo indica que a tensão de escoamento aumenta com o aumento da taxa de deformação. Como consequência, reduz a localização de deformação na presença de gradiente de tensões e opõe-se à rápida formação do pescoço pela melhor distribuição das deformações, tornando-a mais difusa. Entretanto, tensões elevadas são necessárias para conformar peças em altas taxas de deformação. De maneira contrária, um valor de m negativo promove a

localização da deformação e gera gradiente de deformação mais severo. Portanto, ambos, o sinal e magnitudes de m , são importantes (Graf & Hosford, 1990; Hosford, 2007; Bastos, 2009). Assim como n , altos valores de m levam a uma boa estampabilidade em operações de estiramento, mas tem pouco efeito no embutimento, pois se por um lado é benéfico aumentando a resistência ao afinamento das paredes, também aumenta a resistência à deformação do flange (Bastos, 2009).

3.7.4 Coeficiente de anisotropia (r)

Durante a estampagem, a chapa metálica pode apresentar comportamento anisotrópico como resultado de sua textura. Texturas descritas por $\{hkl\} \langle uvw \rangle$ significam que os planos $\{hkl\}$ estão paralelos ao plano da chapa e que a direção $\langle uvw \rangle$ está alinhada com a direção de laminação. A formação de textura favorável nos aços baixo carbono é função da composição do aço, temperatura de acabamento e de bobinamento durante a laminação a quente, porcentagem de redução durante laminação a frio, velocidade de aquecimento e temperatura de recozimento após a deformação a frio (Ferreira Filho *et al*, 2003; Turazi, 2008; Bastos, 2009). A textura de um material pode ser avaliada através da relação entre a resistência oferecida à deformação nas diferentes direções do plano e na espessura da chapa, obtidos a partir de um ensaio de tração. O coeficiente de anisotropia plástica, r , é definido como o quociente entre a deformação verdadeira na largura e na espessura do corpo de prova ensaiado:

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (10)$$

Onde:

r Coeficiente de anisotropia

ε_w Deformação verdadeira na direção da largura

ε_t Deformação verdadeira na direção da espessura

Como a deformação na espessura é muito pequena e a medição da mesma está sujeita a um erro expressivo, pela lei da conservação do volume, pode-se reescrever a Equação 10 da seguinte forma:

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_w + \varepsilon_t} \quad (11)$$

Onde:

r Coeficiente de anisotropia

ε_w Deformação verdadeira na direção da largura

ε_t Deformação verdadeira na direção da espessura

E conseqüentemente :

$$r = \frac{\ln\left(\frac{w_o}{w_f}\right)}{\ln\left(\frac{l_f w_f}{l_o w_o}\right)} \quad (12)$$

Onde:

r Coeficiente de anisotropia

w_o Largura inicial

w_f Largura final

l_o Comprimento inicial

l_f Comprimento final

Como as propriedades mecânicas da chapa podem ter diferentes direções no plano da mesma, é de interesse uma relação média do comportamento de deformação ao longo deste plano. Pode caracterizar, então, o coeficiente de anisotropia normal, determinado a partir de medidas nas direções paralela (0°), transversal (90°) e a (45°) da direção de laminação, conforme Figura 13.

$$\bar{r} = \frac{r_{0^\circ} + 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{4} \quad (13)$$

Onde:

\bar{r} Coeficiente de anisotropia normal ou média

r_{0° Coeficiente de anisotropia na direção de laminação

r_{45° Coeficiente de anisotropia à 45° da direção de laminação

r_{90° Coeficiente de anisotropia à 90° da direção de laminação

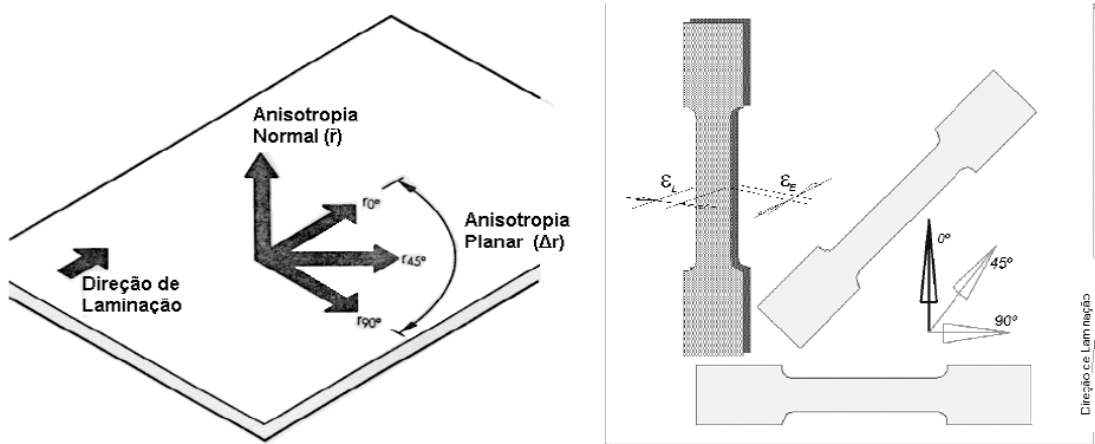


Figura 13 – Representação das principais direções avaliadas para o cálculo da anisotropia planar.
Fonte SME Handbook, 1978

Um coeficiente de anisotropia normal unitário é indicativo de resistência à deformação no plano da chapa igual à deformação na direção da espessura da chapa. Se a resistência na direção da espessura é maior que a média da resistência nas diferentes direções do plano da chapa, a relação de deformação média é maior que a unidade. Neste caso o material é resistente ao afinamento. Em geral, o coeficiente de anisotropia normal, \bar{r} , está diretamente relacionado com a profundidade do embutimento, quanto mais alto o valor de \bar{r} mais profundo será o embutimento (Rocha, 2006).

Os valores da anisotropia normal em aços efervescentes variam de 0,8 a 1,2, em aços acalmados ao alumínio a anisotropia normal pode variar de 1,5 a 1,8, e em alguns aços IF, livre de interstícios, a anisotropia normal pode chegar a 2,2. Já para o cobre e aços inoxidáveis austeníticos, a anisotropia normal pode ser tão

baixa quanto 0,1 (Ferrarini, 2004). Quanto maior for a porcentagem de planos {111} paralelos à superfície da chapa e à direção de laminação, maior será o valor de r (Araújo Neto, 2005; Bastos, 2009). O aumento da porcentagem de planos {111}, ou seja, formação de textura preferencial, está diretamente relacionado com o percentual de redução a frio. Portanto, o percentual de redução a frio possui uma influência significativa no valor de r (Lange, 1993; Araújo Neto, 2005; Bastos, 2009). Esta relação é mostrada na Figura 14 para dois aços, sendo um acalmado ao alumínio e outro IF.

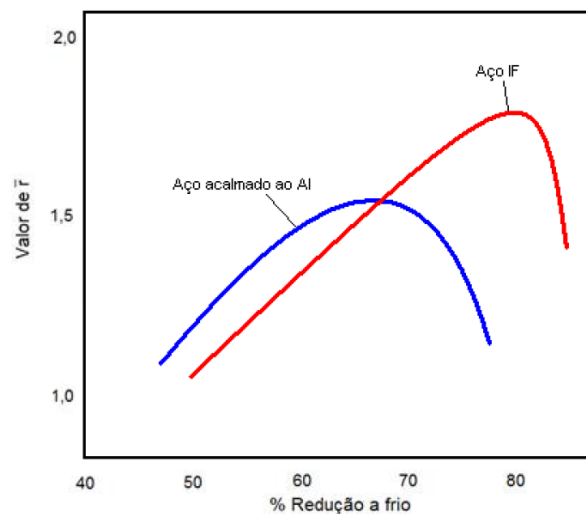


Figura 14 – Efeito do percentual de redução a frio na anisotropia normal para dois aços
Fonte Lange, 1993

Outro parâmetro importante é o coeficiente de anisotropia planar, Δr , que indica a variação do comportamento da deformação nas diferentes direções do plano da chapa. Este é expresso por:

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} - 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{2} \quad (14)$$

Onde:

Δr coeficiente de anisotropia planar

r_{0° Coeficiente de anisotropia na direção de laminação

r_{45° Coeficiente de anisotropia à 45° da direção de laminação

r_{90° Coeficiente de anisotropia à 90° da direção de laminação

Um Δr igual à zero indica que o material apresenta um comportamento isotrópico. É de interesse nas operações de embutimento que seja Δr igual ou próximo de zero, pois isto permitirá uma deformação uniforme sem a formação de “orelhas” em um produto estampado. A anisotropia planar Δr tem relação direta com a altura das orelhas. Normalmente, verifica-se que para $\Delta r > 0$, as orelhas ocorrem a 0° e 90° , sendo característica dos aços baixo carbono, enquanto que para $\Delta r < 0$ as orelhas ocorrem a 45° e 135° em relação à Δr , que é característico dos aços de maior resistência (maior LE) (Plaut, 2005; Ferrarini, 2004). Em geral, materiais com alta anisotropia normal possuem alta anisotropia planar (Lange, 1993; Bastos, 2009).

3.8 ENSAIOS SIMULATIVOS

Os ensaios simulativos são utilizados para avaliar a estampabilidade de chapas metálicas, através da simulação em laboratório da conformação que a chapa vai sofrer em escala industrial, reproduzindo experimentalmente um modo de deformação em particular. Os ensaios simulativos mais comuns são os ensaios Olse, Erichen, Swift, Bulge Test e Fukui. Neste trabalho será usado o método Nakazima que será abordado mais a frente.

3.9 CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO (CLC)

A avaliação da estampabilidade de chapas metálicas pode ser feita através do uso de curvas de limite de conformação, ou CLC's. O conceito das CLC's foi desenvolvido por Keeler em 1965 quando este sugeriu um critério de falha empírico, baseado no par de medidas da maior, ε_1 , e menor, ε_2 , deformações principais em um ponto crítico de falha. Este par de deformações foi definido como o ponto onde eventualmente uma fratura poderia ocorrer. Posteriormente este conceito foi estendido para valores negativos da menor deformação (Woodthorpe, 1969; Goodwin, 1971). Uma CLC, portanto, é um diagrama empiricamente construído, largamente utilizado para descrever o lugar geométrico das deformações principais e críticas, que ocorrem na superfície da chapa, para as quais a estricção localizada se torna visível ou ocorre à fratura. As CLC's são empregadas para avaliar o limite das deformações de um determinado material quando submetido aos diversos modos de

deformação inerentes aos processos de conformação. A Figura 15 mostra CLC's de diversos materiais metálicos. Para controlar as falhas mecânicas no processo, compara-se a distribuição das deformações nas peças com as CLC's do material, obtidos em laboratório. Este procedimento permite ainda inferir se um determinado material está conveniente para a peça projetada, bem como ajustar adequadamente as condições de lubrificação e a geometria do ferramental adotado no processo (Ghosh, 1975; Bastos, 2009)

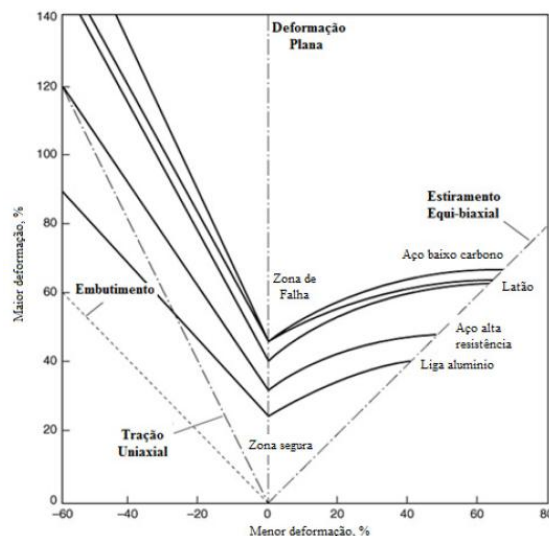


Figura 15 – CLC para vários materiais metálicos

Fonte *Sheet Metal Forming - Tecnologie Industriali - Department of Mechanical Engineering - University of Calabria*

A fim de evitar o surgimento de fraturas ou estricções em uma determinada peça estampada, é necessário que os níveis de deformação em todos os pontos desta peça estejam abaixo da CLC. Uma margem de segurança é normalmente inserida, resultando num deslocamento imaginário da CLC para baixo. O risco de rompimento é determinado pela avaliação da proximidade das deformações da peça em relação a CLC. No entanto, não é suficiente apenas verificar o risco de rompimento quando se está definindo um processo de estampagem. Outros defeitos como afinamento excessivo, enrugamento ou estiramento insuficiente podem ser identificados através da CLC. Através da CLC, pode então ser estabelecida uma “Janela de Conformação”, conforme mostrado na figura 16 (Holmberg et al, 2003; Marciniak, 2002; Bastos, 2009).

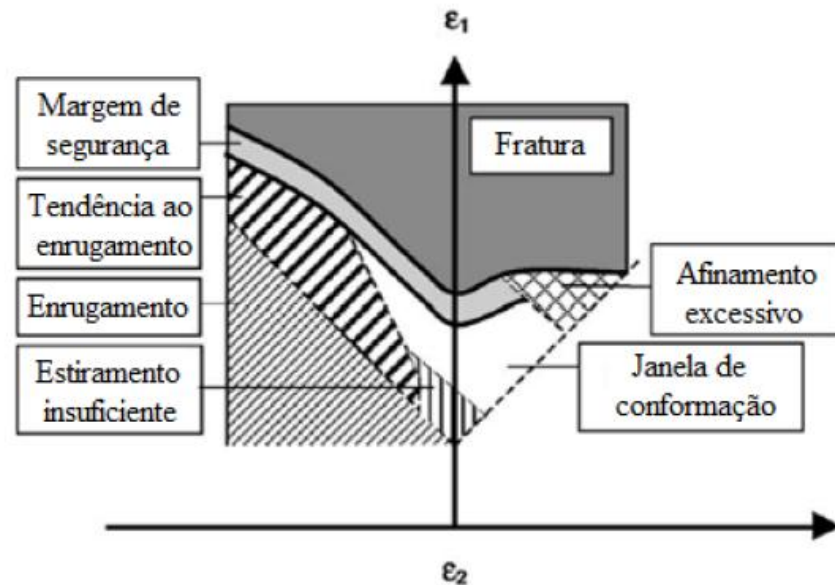


Figura 16 – CLC e a janela de conformação

Fonte Holmberg et al, 2003

Geralmente, a CLC mostra um mínimo para a maior deformação principal, ϵ_1 , quando a outra deformação principal ϵ_2 é igual ou próxima de zero, indicando que o modo de deformação plana da chapa é muito crítico. Estudos mostram que 85% das falhas nas peças estampadas ocorrem nestas condições, com a menor deformação principal no plano da chapa situada entre $\pm 2\%$ (Ayres *et al*, 1979). Isto é devido ao fato de que quando uma das deformações principais no plano da chapa se aproxima de zero a estricção se torna menos difusa, as tensões desenvolvidas são maiores e ocorre então o afinamento da chapa devido à conservação de volume. Para este ponto mínimo da CLC, a deformação principal ϵ_1 é aproximadamente igual ao coeficiente de encruamento, n (Marciniak, 2002; Xua *et al*, 2000; Xu *et al*, 1998; Mielnik, 1991; Rocha, 2003; Bastos, 2009). A utilização da CLC possui algumas limitações e incertezas. A construção da CLC é baseada na hipótese de que as trajetórias das deformações são lineares, por exemplo, o modo de deformação permanece constante durante todo o processo. No entanto, esta condição não é observada na maioria dos casos industriais. Vários estudos a respeito do efeito das trajetórias das deformações da CLC foram conduzidos, como Graf & Hosford (1993) e Friedman & Houston (1999), correlacionando parte deste desvio das trajetórias de deformações aos efeitos do dobramento durante a conformação. Outras dificuldades

na construção da CLC são a grande dispersão dos resultados experimentais e o longo tempo para determinação da CLC, face ao curto prazo para desenvolvimento de um processo nas indústrias. Para minimizar estas dificuldades, foram desenvolvidos diferentes métodos empíricos e teóricos para previsão da CLC (Holmberg et al, 2003; Bastos, 2009).

3.10 FATORES QUE INFLUENCIAM A CLC

Podem ser destacados alguns fatores que de alguma forma alteram as CLC's: coeficiente de encruamento, coeficiente de anisotropia, espessura da chapa, expoente de sensibilidade à taxa de deformação e força no prensa-chapas que será estudado mais detalhadamente a seguir.

3.10.1 Força no prensa-chapas

Vários parâmetros influem no sucesso ou falha do processo de estampagem, como: raios do punção e da matriz, folga entre eles, velocidade de conformação, lubrificação e a restrição ao escoamento da chapa (pressão do prensa-chapas) bem como espessura, coeficiente de encruamento, anisotropia da chapa e outros. Em muitas operações de estampagem se torna necessário uma pressão entre a chapa e a matriz a fim de se evitar problemas como enrugamento, papel desempenhado pelo prensa-chapas. Normalmente esta força é $\frac{1}{3}$ da força necessária para a conformação da chapa (ASM Hambook, 1993). Em casos particulares a determinação da melhor força no prensa-chapas é feita de forma experimental. A Figura 17 mostra o ferramental usado por Altan et al (2007) nos seus ensaios práticos de estampagem. O sistema envolve uma prensa de duplo efeito, onde um dos cilindros de acionamento realiza especificamente a aplicação da carga do prensa chapas. O sistema conta ainda com uma célula de carga para verificação da carga de estampagem. Chemin (2011) realizou ensaios Nakazima com chapas de aço DP600, com o objetivo de se verificar o efeito da força no prensa-chapas na estampabilidade deste aço. Ele utilizou apenas corpos de prova com 200x200mm e 150x150mm, que ofereciam uma área de contato com o prensa-chapas em toda volta da punção, e aplicadas cargas de 130 tf, 80 tf e 58 tf para cada uma das amostras. Para cada corpo de prova foram medidas as deformações máximas atingidas pelo aço até a

ruptura. Com estes dados ele levantou o diagrama limite de conformação (DLC) e a curva limite de conformação (CLC) para cada valor de força no prensa-chapas. Estas curvas foram comparadas com a curva limite de conformação obtida inicialmente pelo método Nakazima (com travamento total da amostra através do “draw bead”). Para força de 130 tf no prensa-chapas a Figura 18 mostra o deslocamento sofrido pela CLC, considerando os pontos de máximas deformações atingidas pelos corpos de prova ensaiados com 130 tf de força no prensa-chapas.

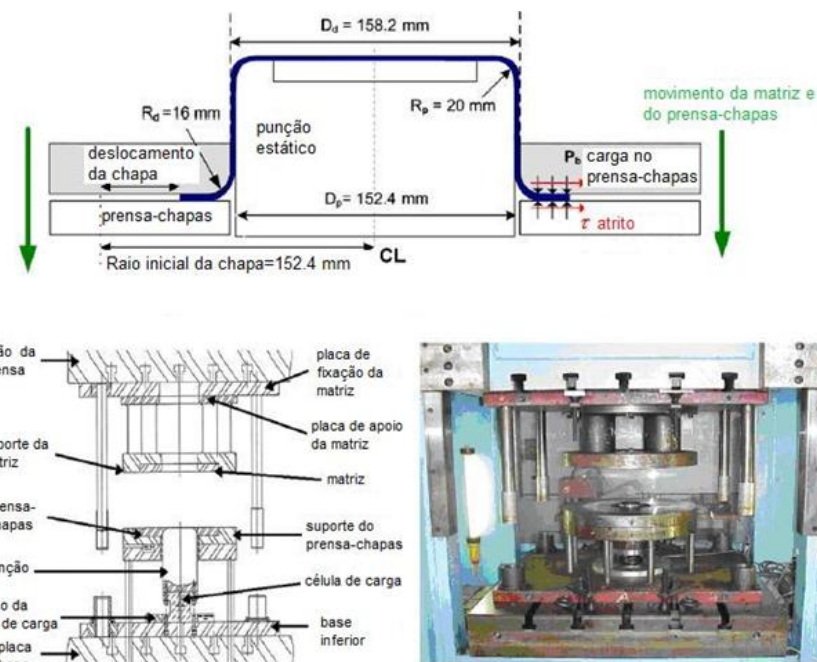


Figura 17 - Ferramental utilizado por Altan et al (2007).

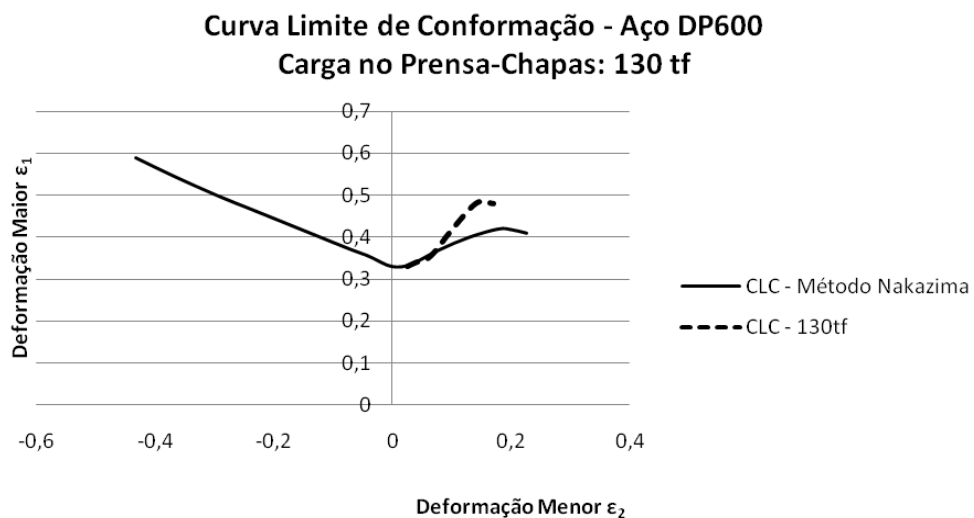


Figura 18. Variação provocada na curva limite de conformação para carga de 130 tf no prensa-chapas

Fonte Chemin, 2011

Chemin (2011) observou através da curva CLC obtida que para carga de 130 tf houve uma melhora da estampabilidade do material na região de estiramento em torno de 22%, ou seja, o aço atingiu um maior nível de conformação até a ruptura final. O autor também afirma que uma pequena diminuição da restrição imposta pelo prensa-chapas à deformação do material permite uma melhora na conformabilidade. A Figura 19 mostra que para a força de 80 tf a curva limite de conformação, nesta condição, ficou praticamente sobreposta à CLC obtida originalmente pelo método Nakazima, ou seja, não houve ganho de conformabilidade.

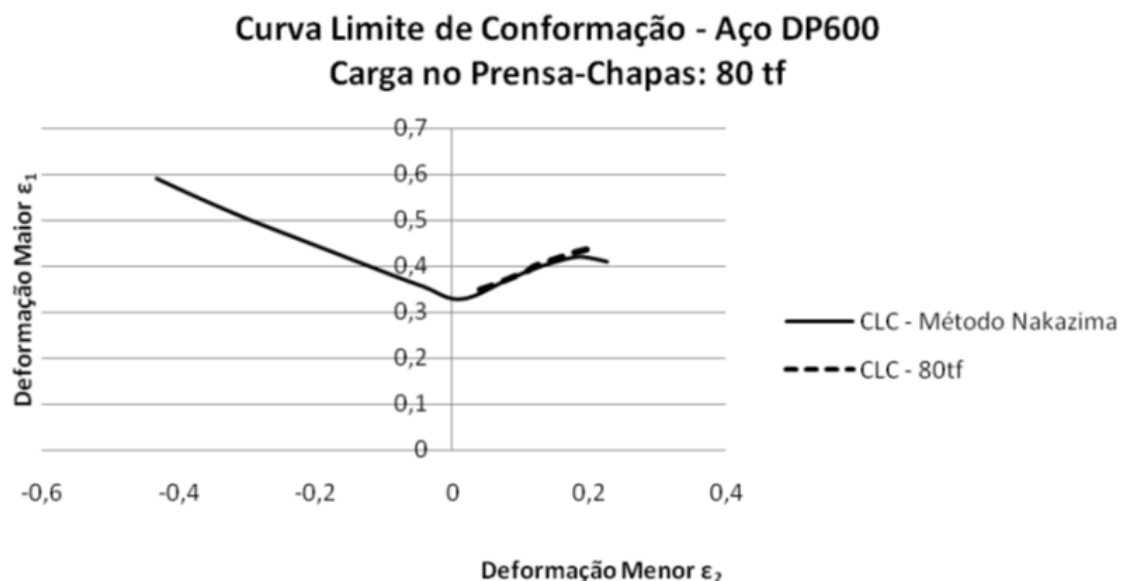


Figura 19 – Variação provocada na curva limite de conformação para carga de 80 tf no prensa-chapas
Fonte Chemin, 2011

Diminuindo-se a carga para 58 tf, Figura 20, Chemin (2011) concluiu que com esta carga permitiu-se um escorregamento ainda maior da amostra durante a estampagem e conseqüentemente uma redução significativa no limite de conformabilidade desse aço (em torno de 8% na conformabilidade do material).

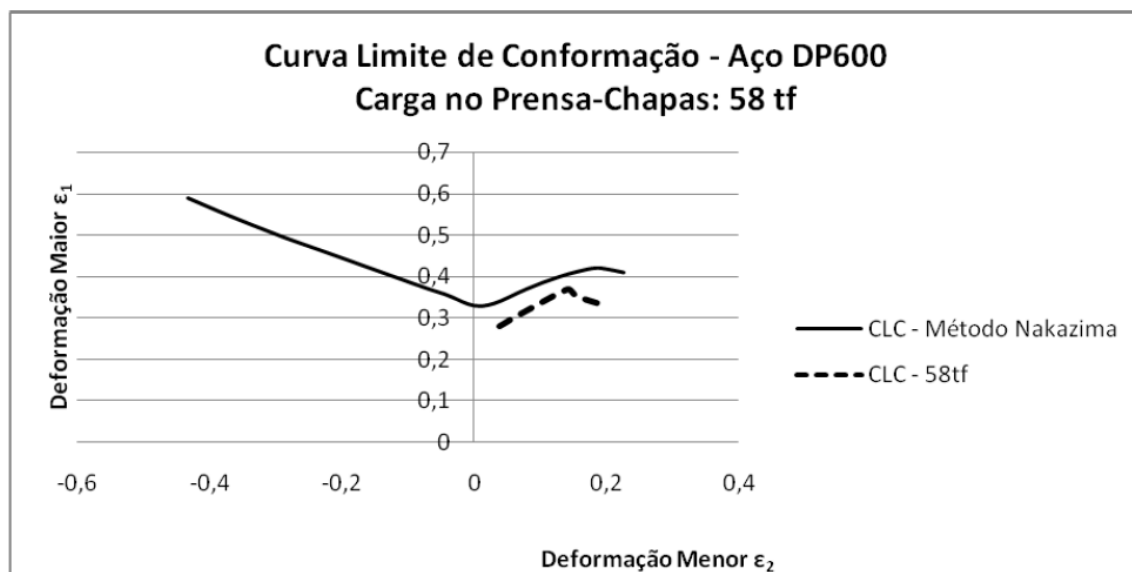


Figura 20 – Variação provocada na curva limite de conformação para carga de 58 tf no prensa-chapas.

O autor também concluiu que existe um ponto ideal, próximo a 130 tf, que representou um ganho em sua conformabilidade quando comparado a uma condição de travamento total do material. É necessário investigar esta condição de força no prensa-chapas, pois em muitas vezes, esta força é ajustada pelo valor mínimo necessário para evitar ondulações no flange, com isso, tendo-se o objetivo de se obter uma melhor estampabilidade pela mínima restrição imposta ao material durante o escoamento. Segundo Chemin (2011) a velocidade de escoamento da chapa sobre o ombro da matriz, interfere no modo de trinca do material que flui para o interior da matriz, o qual devido ao dobramento que, quanto mais acentuado, aproxima o aço do seu limite de resistência podendo até ultrapassá-lo, ocasionando um princípio de estricção localizada neste ponto (fratura por cisalhamento). Chemin (2011) também observou que os corpos de prova 200x200mm e 150x200mm estampados com cargas de 130 tf, 80 tf e 58 tf, apresentaram maiores deformações para menores valores de força no prensa-chapas (Figura 21).

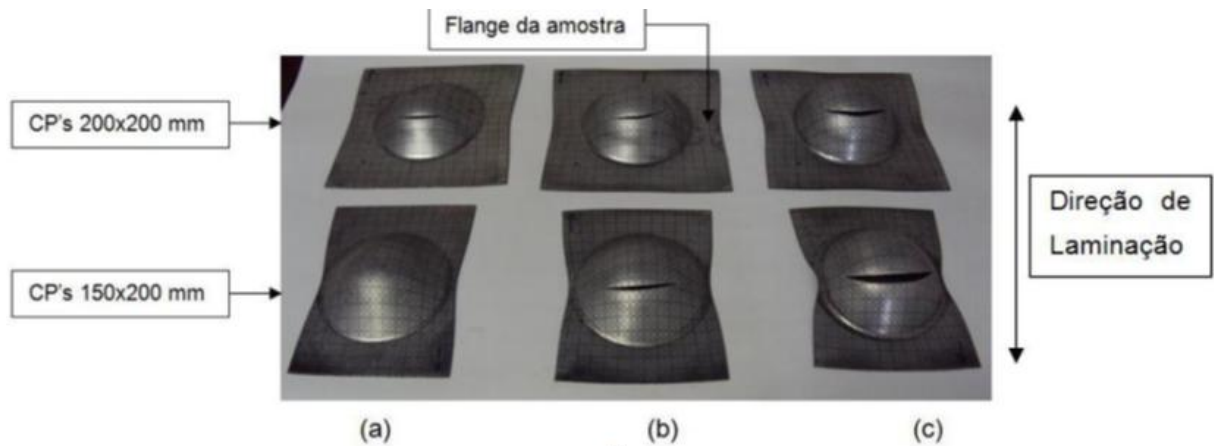


Figura 21 – Corpos de prova de 200x200 mm e 150x200 mm estampados com as forças de 130tf (a), 80tf (b) e 58tf (c), mostrando as deformações no flange.

Fonte Chemin, 2011

A velocidade de escoamento da chapa no flange, segundo Kim et al (2011) pode ser interpretada como a taxa de deformação nesta região (divisão do deslocamento do flange pelo tempo de estampagem), Figura 22.

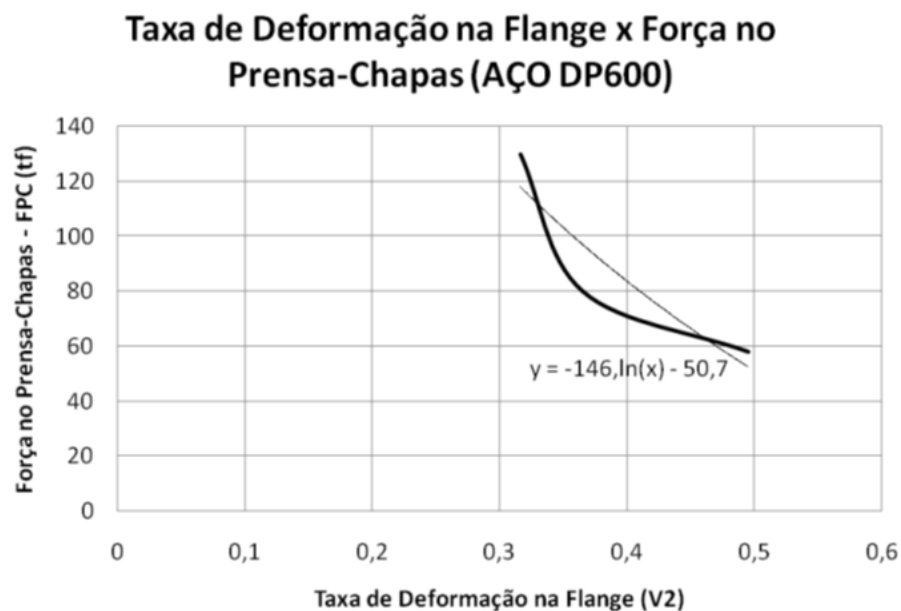


Figura 22 – Variação da taxa de deformação no flange em função da força do prensa-chapas

Fonte Chemin, 2011

A equação obtida é uma tendência da curva correspondente. Wagoner (2011), através de ensaios de dobramento, propôs a equação:

$$\dot{\varepsilon}_{\max} = \frac{V_1(mm/s)}{3t(mm)} \cdot \ln(1 + t/r_d) \quad (16)$$

$\dot{\varepsilon}$ Taxa de deformação

V_1 Velocidade embutimento (mm/s)

t Espessura da chapa (mm)

r_d Raio do ombro da matriz(mm)

As Figuras 23 e 24 mostram que o ponto correspondente à força no prensa-chapas de 80 tf encontra-se numa região crítica, acima da qual se tem uma pequena variação na taxa de deformação da chapa na região do flange para um grande aumento da força no prensa-chapas e, abaixo da qual, se tem um grande aumento na taxa de deformação no flange para pequenas reduções na força do prensa-chapas. Chemin (2011), também determinou uma curva comparativa da variação da deformação maior (ε_1) atingida pelo aço DP600 em função dos valores de força no prensa-chapas (Figura 23).

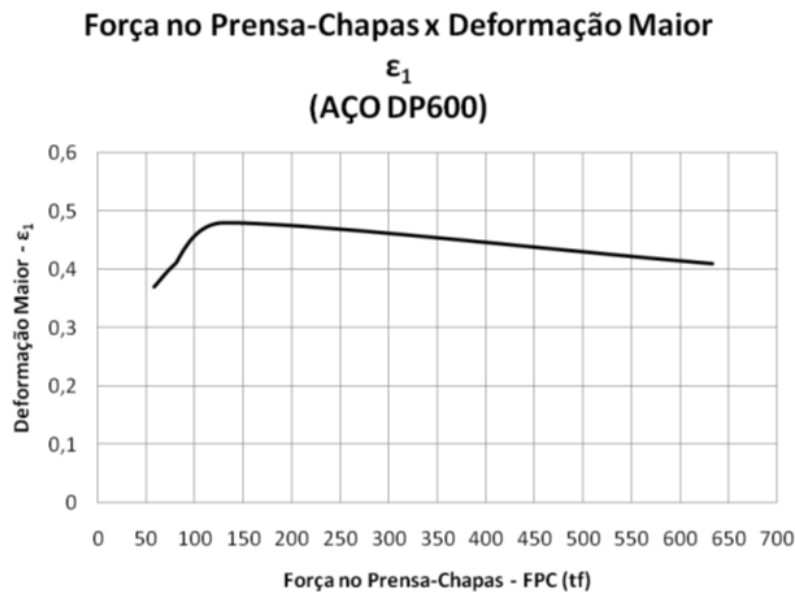


Figura 23 – Variação da deformação maior ε_1 em função da força no prensa-chapas.

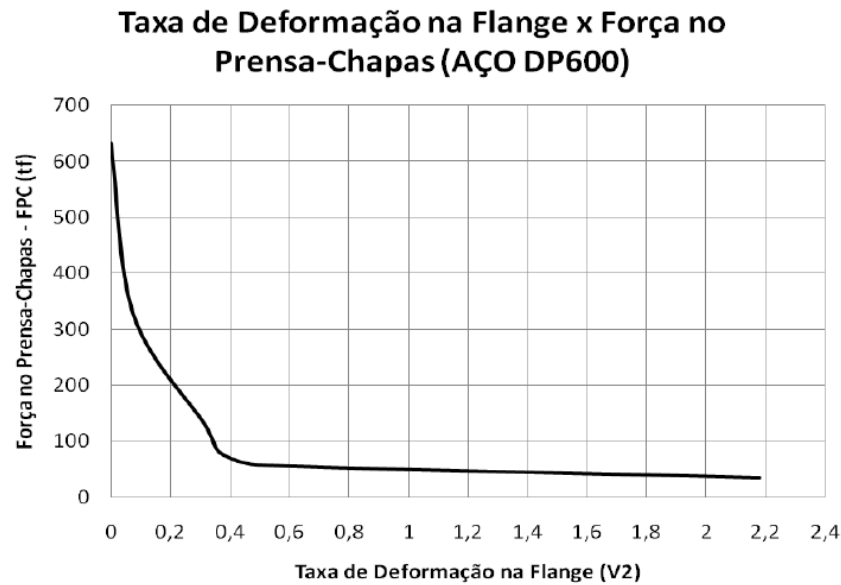


Figura 24 –Variação da taxa de deformação no flange em função da força no prensa-chapas

Fonte Chemin, 2011).

Com estas curvas é possível se determinar uma força ideal para o prensa - chapas que nos possibilite uma máxima deformação do material, sem que este apresente falhas. Este campo ideal de força no prensa-chapas pode servir na prática como base para o dimensionamento e ajuste do mesmo em ferramentas de estampagem. O levantamento dessas curvas para outros aços de última geração ajudarão também neste ajuste das ferramentas, com relação a força do prensa-chapas, quanto ao desempenho das mesmas na produção seriada de peças mais perfeitas, com diminuição de peças descartadas e aproveitando o máximo da conformabilidade do material.

4 AÇOS USADOS EM ESTAMPAGEM

4.1 AÇOS CONVENCIONAIS DE BAIXA RESISTÊNCIA

Os aços convencionais de baixa resistência apresentam alta conformabilidade, devido ao seu baixo teor de carbono, baixa relação LE/LR, alto coeficiente de encruamento e bom comportamento sobre condições de estirabilidade. No entanto apresentam baixa resistência, o que leva ao uso de chapas mais grossas, comprometendo o peso dos veículos. Alguns exemplos são os aços livres de intersticial, isótropo e o aço doce. Devido o baixo teor de carbono os aços doces recebem este nome. Possuem uma microestrutura essencialmente ferrítica e são classificados como:

1. qualidade comercial
2. estampabilidade média
3. estampabilidade profunda
4. estampabilidade extra profunda

São utilizados em peças que se exijam grande capacidade de deformação, tanto em estiramento quanto em embutimento profundo.

4.2 AÇOS CONVENCIONAIS DE ALTA RESISTÊNCIA

Os aços convencionais de alta resistência possuem microestrutura semelhante aos de baixa resistência porém com uma resistência mais elevada entre 270 e 700 MPa como por exemplo aços carbono-manganês e aço de alta resistência e baixa liga.

4.3 AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA (ARBL)

Aços de alta resistência e baixa liga (HSLA) possuem micro adições de elementos de liga aos quais contribuem para a precipitação de finos carbeto e refinamento do tamanho de grão (ARCELORMITAL 2009). Possuem boa conformabilidade, soldabilidade e resistência a fadiga e ao impacto. Os aços HSLA são muito usados na indústria automotiva em componentes estruturais (Lajarin, 2012). A Tabela 1 mostra a influência das micro adições de elementos de liga nas propriedades do aço HSLA.

Tabela 1. Efeito da adição de elementos de liga nas propriedades de um aço ARBL
(C IMM,2013) t_o

Elementos de liga num aço de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL, BLAR ou HSLA)		
Elemento	Percentagem	Efeito nas propriedades
Cobre	0,2 - 1,5	Melhora a resistência á corrosão atmosférica
Níquel	Ao menos a metade do percentual do cobre	Beneficia a qualidade superficial
Nióbio	0,02	Aumenta o limite de resistência e limite de escoamento
Nitrogênio	0,003 - 0,012	Contribui para a resistência e pode melhorar a soldabilidade
Vanádio	Até 0,12	Melhora a resistência sem reduzir a soldabilidade
Obs.: Pequenas quantidades de cálcio, terras raras e zircônio podem estar presentes para controle da forma de inclusões de sulfetos (globulização)		

Aços de alta resistência e baixa liga, conhecidos pela sigla ARBL (ou HSLA no idioma inglês, significando: *high strength low alloy*) são definidos do seguinte modo: aços específicos com composição química especialmente desenvolvida para proporcionar mais altos valores de propriedades mecânicas, e, em alguns casos melhor resistência à corrosão atmosférica do que àquela obtida em aços carbono convencionais. São produzidos com maior ênfase nas propriedades mecânicas do que na composição química. Por outro lado, não podem ser considerados aços de alta liga, pois os teores de elementos de liga adicionados aos aços ARBL são muito mais baixos do que em aços de outras categorias, como aços inoxidáveis e aços ferramenta.

Aços ARBL podem ser produzidos na condição de laminados com resistência ao escoamento na faixa de 290 a 550 MPa e resistência à tração na faixa de 415 a 700 MPa. Por causa de seu baixo teor de carbono apresentam excelente soldabilidade. Seu desenvolvimento foi impulsionado pela demanda por aços resistentes, tenazes e soldáveis para tubulações de transporte de óleo e gás, navios e plataformas de perfuração “*off-shore*”. Também podem ser usados para reduzir o peso (massa), e assim o consumo de combustível, de (componentes de) automóveis. Os graus de

classificação de aços ARBL são definidos pelos níveis de resistência ao escoamento e não pela composição química.

Os mecanismos de endurecimento utilizados nos aços ARBL incluem: a) refino de grão; b) precipitação; c) subestrutura de discordâncias; d) endurecimento por solução sólida; e) envelhecimento com deformação.

A sua produção pode envolver: a) pequenas adições de elementos formadores de carbeto e nitreto (microligantes); b) laminação controlada; c) resfriamento controlado; d) controle de forma de inclusões. Estes fatores podem ser abordados separadamente ou em combinações para produzir as propriedades desejadas.

Após o surgimento dos aços HSLA os esforços de desenvolvimento dos mesmos concentraram-se em aumentar a conformabilidade, particularmente em melhorar a ductilidade através da espessura e a tenacidade na placa. A ocorrência de arranjos planares localizados de inclusões não metálicas não é apenas prejudicial à tenacidade e ductilidade, mas também resulta num defeito de soldagem denominado arrancamento lamelar. Para resolver esse problema passou-se a fazer uso intensivo de adições de zircônio, cério ou cálcio.

As microestruturas de muitos aços ARBL caracterizam-se pela presença de ferrita e perlita, mas alguns outros aços dessa categoria apresentam outros tipos de microestrutura, como ferrita-bainita, martensita temperada ou bainita. Os aços bainíticos já constituem uma categoria à parte. A Figura 25 mostra uma micrografia característica de um aço HSLA, onde os grãos claros se constituem de ferrita e os escuros de perlita.

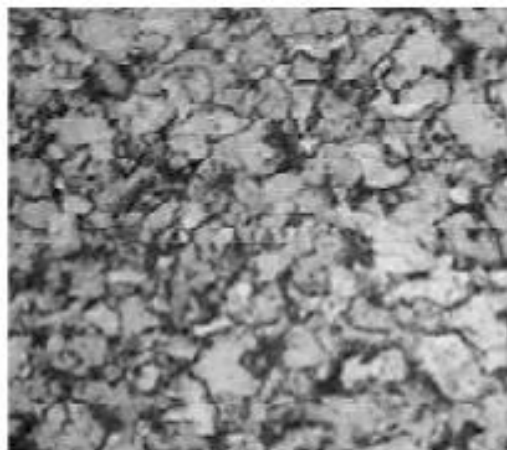


Figura 25 - Micrografia de um aço HSLA , aumento 400X , ataque nital 25%.

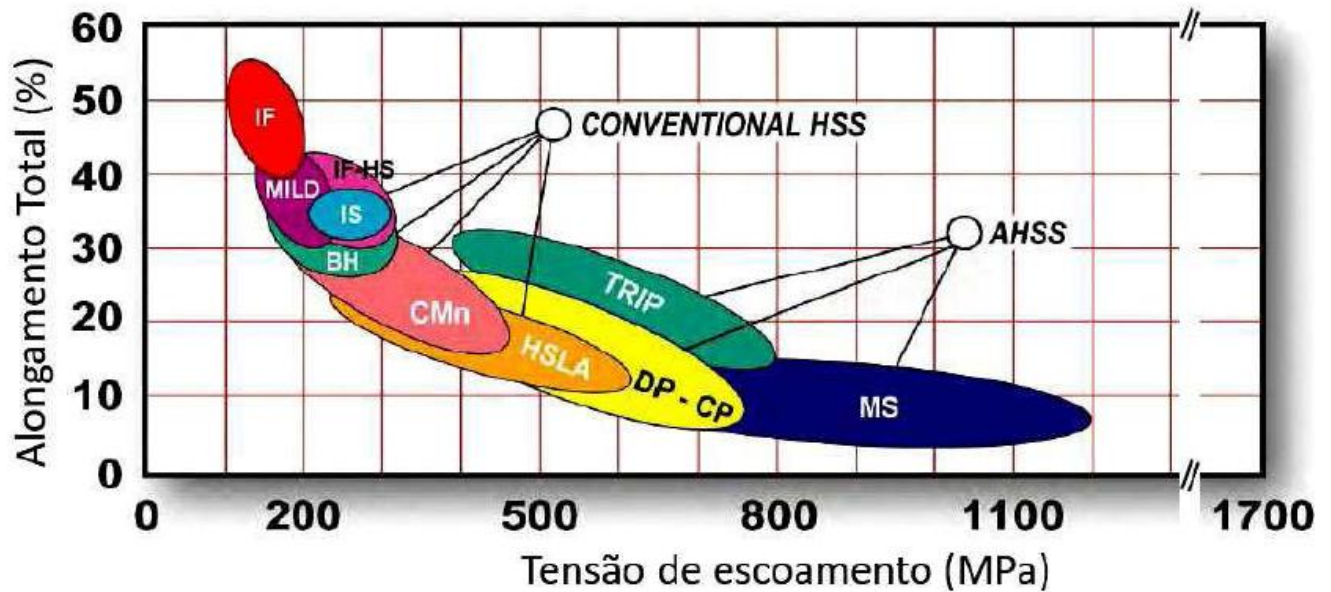


Figura 26 - Relação entre ductilidade e resistência de várias categorias de aços amplamente utilizados na estrutura dos automóveis

Fonte IISI, 2002

De acordo com a Figura 26, o acúmulo do nível de resistência mecânica do material leva quase inevitavelmente a redução do seu alongamento total ou seja de sua estampabilidade. Contudo o uso de microestruturas adequadas permite minimizar a perda de ductilidade aos maiores níveis de resistência mecânica (Schroder, 2004).

5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

5.1 INTRODUÇÃO

Chapas de aço HSLA440 foram usadas em ensaios de estampagem proposto por Nakazima, porém, será necessária uma análise prévia do material a ser utilizado nos ensaios, ou seja, sua caracterização que são listados a seguir:

1. ensaio metalográfico: para verificação da direção de laminação, textura e identificação das fases presentes.
2. análise química: para caracterização das chapas de aço, quanto à sua composição química.
3. ensaios de tração: para determinação das propriedades mecânicas e parâmetros de estampabilidade do material.
4. ensaios de estampagem Nakazima: utilizando-se o método tradicional, com punção hemisférico, para obtenção da CLC e variando-se a carga no prensa-chapas para analisar a sua influência na conformabilidade do material, através das mudanças na CLC.

5.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Foi utilizado nos ensaios o aço HSLA440, com características de alta resistência mecânica e alta estampabilidade.

Um aço para estampagem apresenta boa conformabilidade quando ele possui baixas tensões de escoamento e altos valores de alongamento, de coeficiente de anisotropia normal e coeficiente de encruamento (Chemin, 2011). A redução de peso e economia de combustível aliados à segurança em automóveis, levaram ao uso de aços de alta resistência como: aços de alta resistência e baixa liga (HSLA), *Dual Phase* (DP), *Transformation Induced Plasticity* (TRIP) e outros.

5.3 ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

5.3.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Como o objetivo deste trabalho não é a determinação da composição química do aço em estudo, neste trabalho foi adotada a composição química fornecida pelo fabricante, a qual é apresentada na seção Resultados e Discussões.

5.3.2 ENSAIOS METALOGRAFICOS

Foram realizados no laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR.

O procedimento padrão de ensaio segundo Souza (2004) é:

1. embutimento da amostra da chapa em baquelite.
2. lixamento com quatro tipos de lixas com diferentes granulações.
3. polimento e ataque com nital (solução de ácido nítrico e álcool).
4. análise da amostra em microscópio para observação da microestrutura: morfologia dos grãos (identificação das fases presentes), influência de propriedades mecânicas do aço, características da sua estampabilidade e ainda direção de laminação da chapa.

5.3.3 ENSAIOS DE TRAÇÃO

Foi adotado o corpo de prova com formato de “gravata” mostrado na Figura 27. Este formato e dimensões atendem as normas da ABNT NBR 6673, ASTM E646 e DIN 10002-1, uma vez que elas estabelecem dimensões mínimas e máximas para o corpo de prova, atendendo assim as exigências do ensaio.

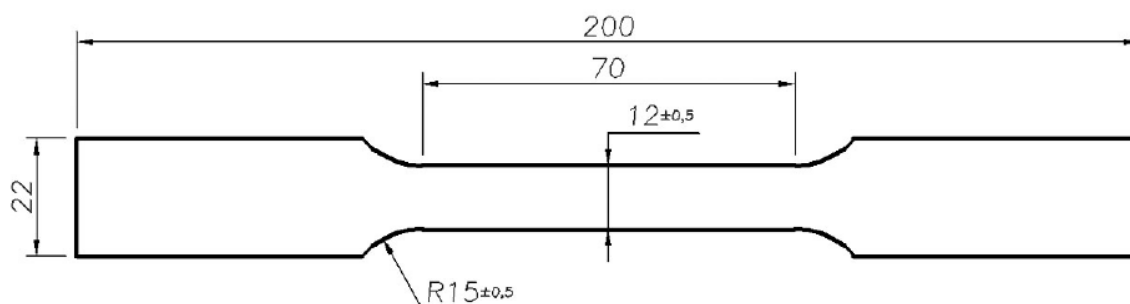


Figura 27 – Desenho do corpo de prova para o ensaio de tração.

Os corpos de prova foram estampados (recortados) no Laboratório de Conformação Mecânica da UFPR, em matriz desenvolvida especialmente para confecção das amostras. Em seguida foi executado acabamento por limagem na seção lateral (área útil) a fim de reduzir sulcos e rebarbas que possam acarretar pontos de concentração de tensões e interferir nos resultados obtidos. Os corpos de prova foram extraídos formando ângulos de 0°, 45° e 90° em relação à direção de laminação (Tabela 2).

Foram seis corpos de prova para cada direção de laminação da chapa de aço:

1. três para levantar o fator de anisotropia e o fator de encruamento.
2. três para determinação do limite de resistência e alongamento.

Assim foram utilizados 18 corpos de prova para realizar os ensaios de tração do aço em estudo. O número de corpos de prova foi definido de forma a atender as normas já mencionadas.

Tabela 2 – Quantidade de corpos de prova necessários no ensaio de tração para levantamento das propriedades n , r , LR, LE, AI.

Aço	Direção de laminação	Quantidade de CP's para determinar n e r	Quantidade de CP's para determinar LR, LE e AI	Total de CP's para cada direção de laminação
HSLA440	0°	3	3	6
	45°	3	3	6
	90°	3	3	6

O ensaio de tração foi realizado em uma máquina da marca EMIC, com capacidade de 10 toneladas, pertencente ao Laboratório de Materiais, no Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR. Para realização do teste selecionou-se no microcomputador, instalado na máquina, o programa para determinação dos fatores de anisotropia e encruamento. Iniciaram-se os ensaios com um dos corpos de prova recortados a 0° da direção de laminação, medindo-se os valores de espessura e largura da região útil acoplou-se o extensômetro, entrou-se com os dados pedidos pelo programa: espessura inicial, largura inicial, comprimento útil e direção de laminação. Para a determinação dos coeficientes de anisotropia e encruamento o corpo de prova foi deformado até um percentual de 18% do seu comprimento útil. Pelos ensaios de tração foram determinados os valores de:

1. fator de anisotropia r
2. coeficiente de encruamento n
3. limite de resistência LR
4. alongamento Al
5. tensão de escoamento LE

Todos esses dados auxiliam na avaliação das características de estampabilidade das chapas de aço e grau de conformabilidade com que o material foi submetido durante o processo de fabricação. Retirado o corpo de prova da máquina mediram-se os valores finais de espessura e largura da região útil, após a deformação do mesmo. Entrando-se com estes dados no programa o computador calcula o valor da anisotropia r para esse corpo de prova, retirado a 0° da direção de laminação. Este procedimento foi repetido três vezes para cada direção de laminação. O programa calcula ainda o valor médio da anisotropia para cada direção, além da média \bar{r} e da tendência ao orelhamento Δr (anisotropia planar). Selecionando o programa correspondente a este ensaio determinou-se ainda, com os mesmos dados, os coeficientes de anisotropia e encruamento. Em seguida foram realizados os ensaios para obtenção dos limites de resistência, escoamento e alongamento para o aço em estudo, levando os corpos de prova até a ruptura. Também foram utilizados três corpos de prova para cada direção de laminação.

5.3.4 Ensaio de estampagem Nakazima

A ferramenta de ensaio, mostrada na Figura 28, pertence ao Laboratório de Conformação Mecânica da UFPR, projetada e construída por Gipiela (2012), em seu doutoramento. As dimensões da ferramenta foram diminuídas em relação ao recomendado por Nakazima em virtude da capacidade da prensa hidráulica do laboratório de conformação da UFPR.

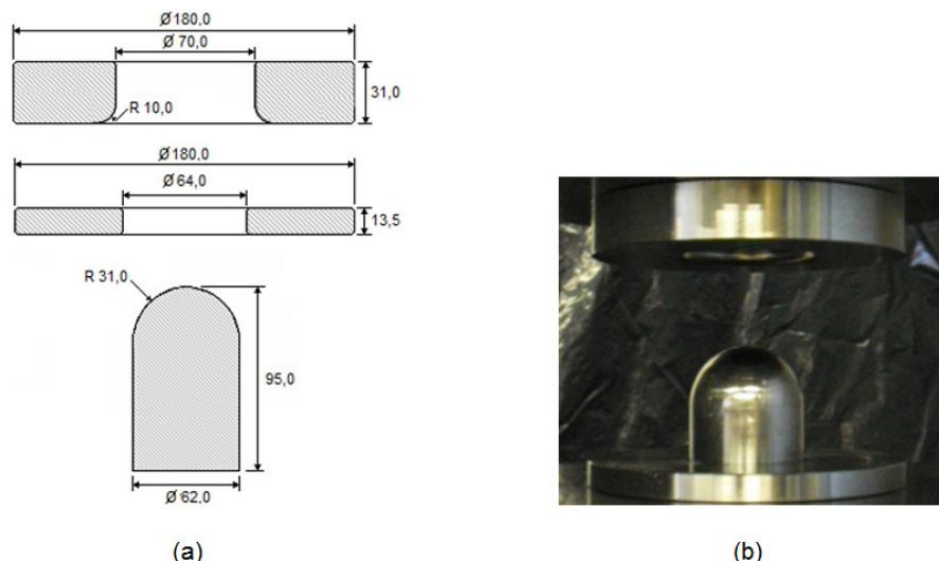


Figura 28- Ferramental desenvolvido para execução dos ensaios de Nakazima: (a) desenho e (b) como fabricado
Fonte Gipiela, 2012

A ferramenta de ensaio Nakazima é composta de:

1. Punção: é de forma hemisférica com raio de 31 mm, responsável pela deformação do material.
2. Matriz: com diâmetro interno de 70 mm atua de tal maneira que a chapa seja empurrada pelo punção para dentro do seu furo central. Serve como uma espécie de “forma” que delimita o diâmetro do copo embutido.
3. Prensa-chapa: possui diâmetro interno de 64 mm. É responsável por posicionar e prender a chapa que será ensaiada, permitindo alinhamento com o equipamento e fazendo com que o material não escorregue livremente sob o efeito do punção.

Para o ensaio Nakazima geralmente são recomendados dezoito corpos de prova, todos com 200 mm de comprimento e com altura variando entre 40 mm a

200 mm. A variação de largura é imprescindível para simular desde estiramento passando pela deformação plana até o embutimento profundo, nos corpos de prova mais estreitos (Figura 29). Neste trabalho, porém, foram utilizados nos testes seis corpos de prova, três com 130x130 mm e três com 50x130 mm com entalhe, mesma quantidade e dimensões utilizados por Gipiela (2012) em sua tese de doutorado onde a curva CLC foi obtida de forma satisfatória. A redução das dimensões dos corpos de prova é decorrente da capacidade da prensa do laboratório de conformação. Corpos de prova com entalhe foram cortados a laser e os outros na guilhotina (Figura 30).

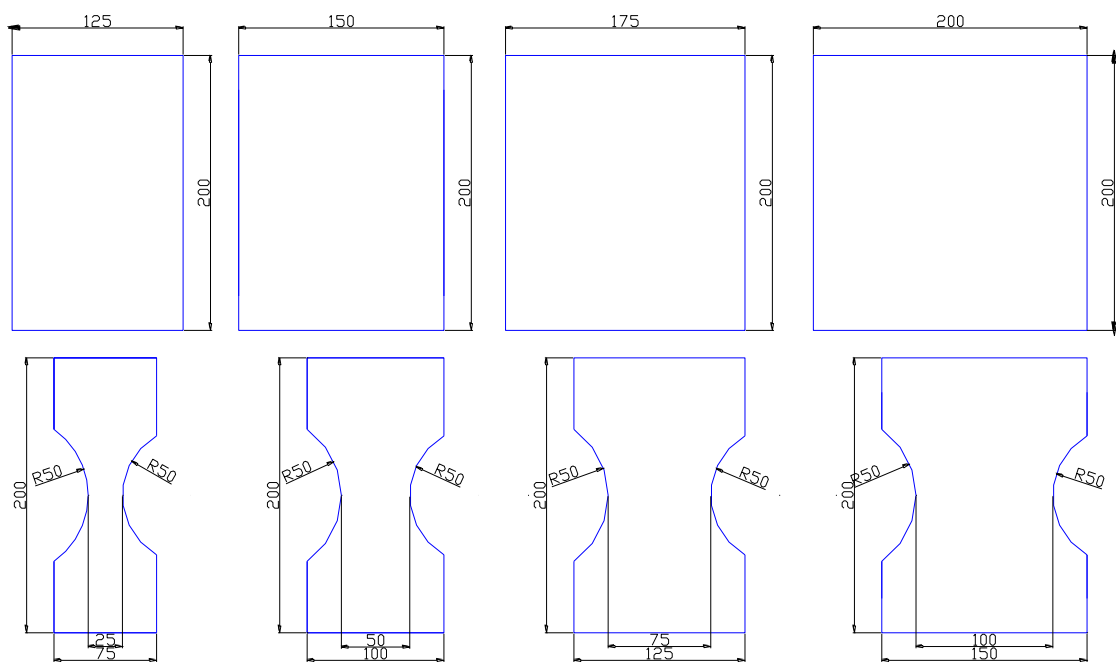


Figura 29 - Desenho dos corpos de prova recomendados para ensaio de estampagem Nakazima para o levantamento da CLC

Fonte Chemin, 2011

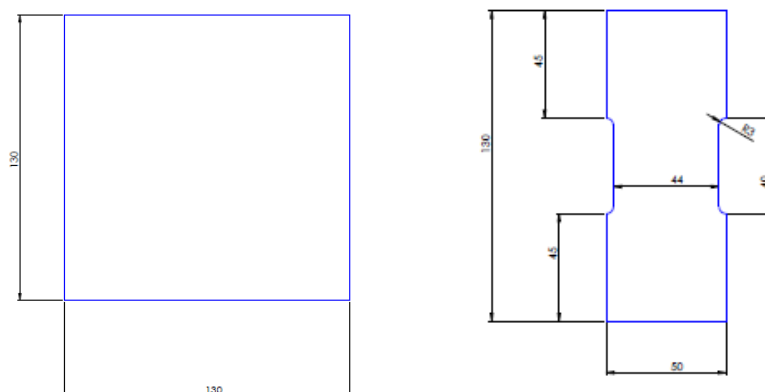


Figura 30 - Desenho dos corpos de prova usados nos ensaios de estampagem Nakazima para levantamento das CLC's.

Foram confeccionados ao todo seis corpos de prova do aço HSLA440, conforme Tabela 3, para levantamento da CLC.

Tabela 3. Quantidade de corpos de prova necessários para o ensaio de estampagem.

Dimensões dos Corpos de prova (mm)	Quantidade de corpos de prova	Carga aplicada no prensa chapa	Finalidade dos corpos de prova
50x130	3	F1 1002 kN	CLC
130x130	3	F1 1002 kN	CLC

Em cada corpo de prova foi impressa uma malha de círculos na superfície com objetivo de se medir a deformação sofrida pelo material durante a estampagem. Esta marcação foi feita por serigrafia através de uma máscara com o desenho da malha (processo mais simples e econômico). O processo consistiu em se preparar uma tinta própria para metais, diluindo com solvente e ácido nítrico à 25%. Coloca-se a malha sobre a superfície do corpo de prova onde será pintada e impressa a malha de círculos, tangentes entre si, deixando-se secar por 48 h. Embora seja recomendada malha com círculos 1/10 de polegada (2,54 mm) (Keeler, 1968), foi usada malha com diâmetro de 4,2 mm que, segundo Marcondes (2002), é suficiente para se levantar a CLC. Deve-se regular a máquina quanto ao alinhamento do punção de acordo com as folgas entre punção e matriz e limitar o curso da ferramenta. Monta-se, então, dispositivos de controle e captação de resultados dos ensaios:

1. válvula de controle de fluxo: regula-se a velocidade da punção permitindo que se possa controlar o final do ensaio quando o corpo de prova apresentar uma leve trinca.

2. manômetro: indica o valor da pressão aplicada no prensa chapas e a leitura da carga exigida para deformação do material (com isso, também é possível perceber o instante de ruptura do material). Neste momento a carga permanece constante, isto porque, o material começa a sofrer estricção (relaxamento de tensões do material) o que leva o material à ruptura. Para se medir a altura máxima do copo formado no corpo de prova utiliza-se uma régua eletro-óptica à ferramenta, permitindo a leitura máxima do percurso do punção até a ruptura da chapa.

Após o processo de estampagem notou-se na malha impressa na superfície da chapa uma deformação dos círculos da malha tomando formas de elipse ou o instante da ruptura, como mostra Figura 31.

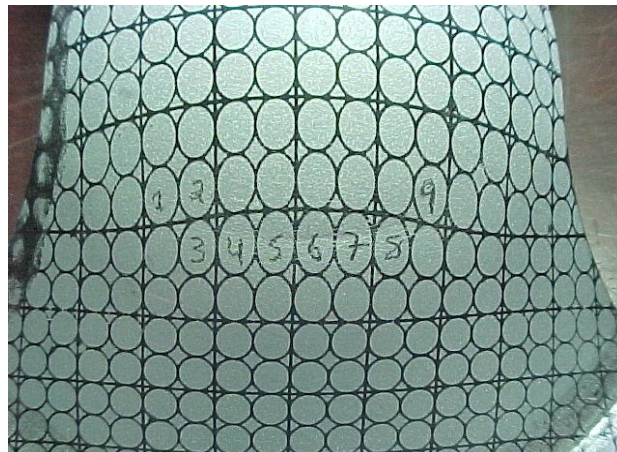


Figura 31 - Elipses e círculos formados após a deformação do material

Fonte: Chemin, 2011

Para se medir esta deformação foi usado um paquímetro digital e uma lupa. Foram tomadas duas medidas: valores do eixo maior e menor das elipses formadas pela deformação do material. Estas medidas foram feitas no lado oposto à trinca em faixas imediatamente superior e inferior à fratura (Figura 32).

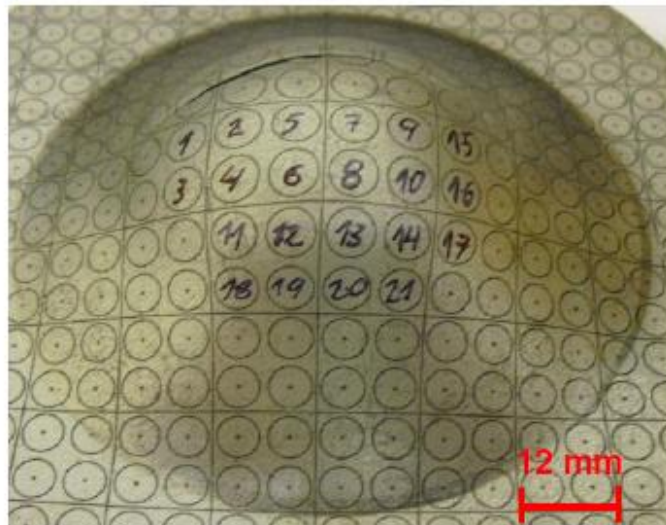


Figura 32 – Corpo de prova ilustrando os pontos de medição das deformações maior e menor, para levantamento da CLC

Fonte Gipiela, 2012

Com estes valores foi montada a curva CLC para o material em estudo. Utilizando-se das medidas de menor e maior diâmetro das elipses formadas durante a deformação até a ruptura do material, calculou-se, então, as deformações verdadeiras e foi plotado o diagrama DLC e, posteriormente, traçou-se a curva CLC.

5.3.5 Ensaios para análise da influência da carga do prensa-chapas

A segunda etapa de ensaios visa a análise da influência da força do prensa-chapas na conformabilidade do aço HSLA440. Para isso foram realizados novos ensaios Nakazima, usando corpos de prova com 130 x 130 mm e 50 x 130 mm, e aplicação de cargas de 401 kN e 300,6 kN para cada uma das amostras.

Desta forma, para cada corpo de prova ensaiado, foram medidos os pontos de deformações máximas atingidos pelo aço até a sua ruptura. A partir destes valores se obteve o diagrama limite de conformação (DLC) e a curva limite de conformação (CLC) para cada valor de força no prensa-chapas, e este resultado foi comparado à curva limite de conformação obtida inicialmente com a carga de 1002 KN com praticamente o travamento total da amostra.

Para cada carga foram estampadas três amostras para cada medida de corpo de prova, conforme a Tabela 4. Os testes com cada um destes conjuntos de amostras apresentados nesta tabela foram repetidos ainda para cada condição de carga prevista para o prensa-chapas.

Tabela 4. Corpos de prova para ensaios de estampagem com o aço HSLA440, variando a força no prensa-chapas e a dimensão do corpo de prova.

Dimensões dos corpos de prova (mm)	Quantidade de corpos de prova	Força no prensa-chapas (kN)
50 x130	3	F2 401
130x130	3	F2 401
50 x 130	3	F3 300,6
130 X 130	3	F3 300,6

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

6.1.1 Propriedades Mecânicas

Os ensaios de tração, realizados com os corpos de prova a 0°, 45° e 90° em relação a direção de laminação da chapa, forneceram informações relativas as propriedades mecânicas do material como o limite de resistência (LR), tensão de escoamento (LE) e alongamento (Al). Estas propriedades caracterizam o material quanto aos seus valores limite em termos de resistência (LR), a tensão máxima atingida ao final da deformação elástica e consequente início de deformação plástica (LE) e finalmente o alongamento máximo (Al) do material até o instante da fratura.

Outras propriedades calculadas ao final dos ensaios de tração foram o coeficiente de encruamento “*n*” e fator de anisotropia “*r*” dos materiais. Estes dois parâmetros caracterizam o material quanto a sua estampabilidade.

Na Tabela 5 está descrito o material ensaiado e algumas de suas propriedades mecânicas. Na Tabela 6 são apresentados os coeficientes de

encruamento e na Tabela 7 os coeficientes de anisotropia. O aço HSLA440 com 17,5% de alongamento apresentou um grande desempenho, pois conseguiu aliar essa boa capacidade de deformação a um limite de resistência de 542 MPa. O coeficiente de encruamento médio foi de 0,138. Pela Tabela 9 percebe-se que esse aço é anisotrópico, ou seja, apresenta propriedades diferentes em direções diferentes do material. O valor de $\Delta r = -0,779$ (negativo) apresenta uma anisotropia planar e indica a tendência ao orelhamento nos ângulos de 45° a direção de laminação. No caso do aço hsla440 utilizado neste trabalho pode-se afirmar que é um aço de boa conformabilidade pois o fator r e o coeficiente n deste aço apresentaram valores próximos para de 1,0 para r e 0,138 para n .

Tabela 5. Propriedades mecânicas aço HSLA440

Material	Espessura (mm)	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência máxima (MPa)	Along. Total (%)	Along. Total (%)	Módulo de elasticidade (GPa)
HSLA440	1,50	415	542	12,3	17,5	208

Tabela 6. Coeficientes de encruamento

Material	n_0	n_{45}	n_{90}	n_{medio}
HSLA440	0,147	0,133	0,135	0,138

Tabela 7. Coeficientes de anisotropia plástica do material.

Material	r_0	r_{45}	r_{90}	Δr	r_m
HSLA440	0,605	1,627	1,088	-0,779	1,237

Na fig. 33 é mostrada a curva tensão - deformação de engenharia, obtida através do ensaio de tração do aço HSLA440 e na fig. 34 a curva de tensão - deformação verdadeira. À partir destas curvas pode-se observar que o aço HSLA440 apresenta uma boa combinação entre resistência mecânica e grandes capacidades de deformação e encruamento, fatores estes, interessantes na fabricação de componentes automotivos.

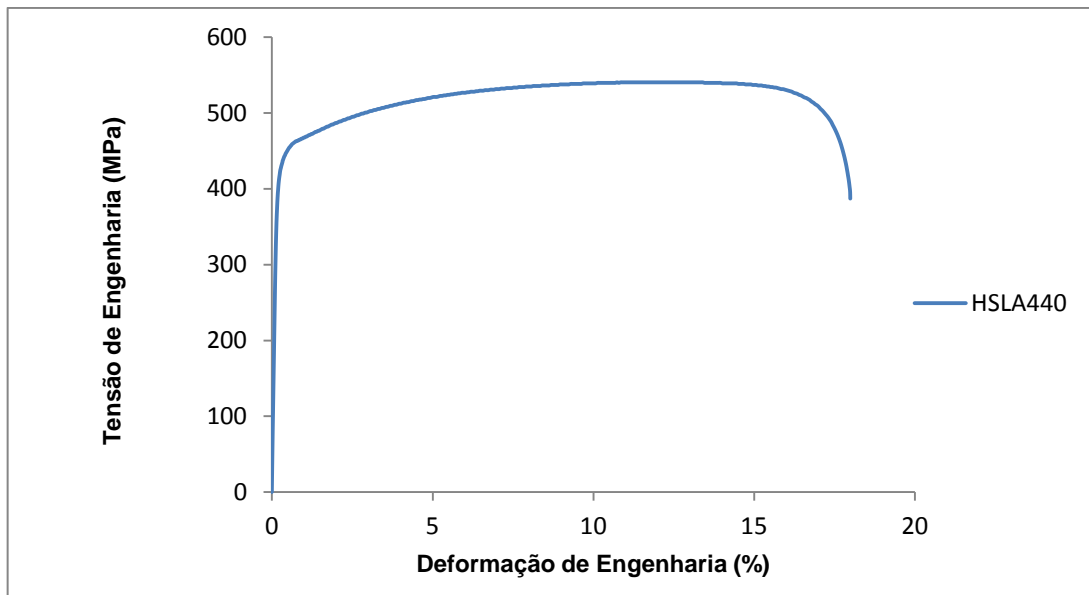


Figura 33- Curva tensão-deformação de engenharia do aço HSLA440.

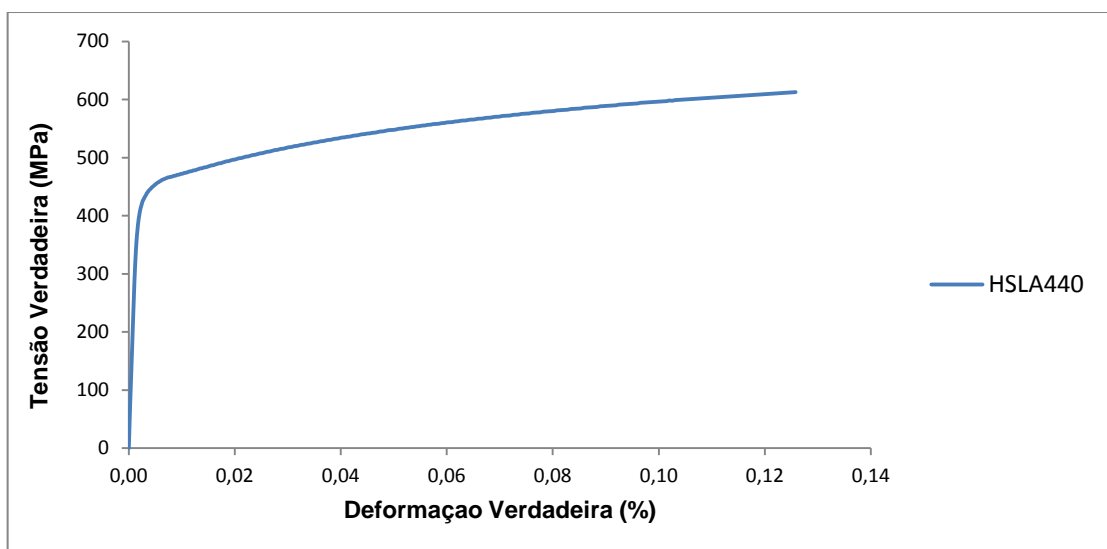


Figura 34 - Curva tensão-deformação verdadeira do aço HSLA440.

6.1.2 Composição química e metalografia

Na Tabela 8 é apresentada a composição química do material ensaiado, segundo o fabricante. Como pode ser observado esse aço automotivo tem baixo percentual de carbono e micro adições de elementos de liga que conferem ao material ductilidade e alta resistência.

Tabela 8 – Composição química do aço HSLA440 em (%).

Material	C	Si	Mn	P	Al	Nb	V	B	Ti
HSLA440	0,08	0,03	0,06	0,021	0,029	0,033	0,058	0,0024	0,026

A figura 35 mostra a micrografia ótica do aço HSLA440 de acordo com o ensaio metalográfico realizado em um corpo de prova embutido em baquelite, posteriormente lixado e polido e finalmente atacado com Nital 3%. O resultado deste ensaio é mostrado nessa micrografia que apresenta uma microestrutura formada basicamente por ferrita-perlita com traços de bainita e martensita.

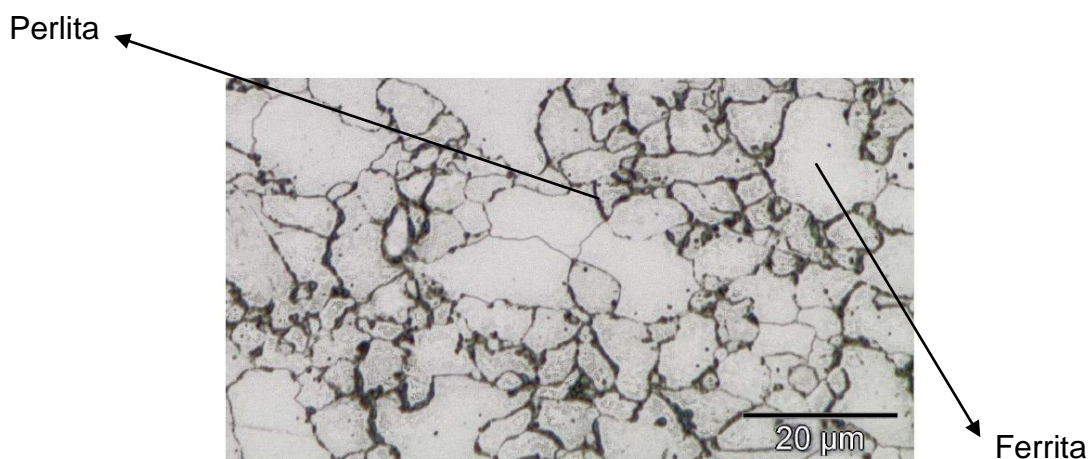


Figura 35 - Micrografia ótica do aço convencional de alta resistência HSLA440, ataque com Nital 3% durante 20 segundos.

6.1.3 Ensaio de estampagem para levantamento da CLC

A partir da configuração de ensaio proposta na seção de procedimento experimental deste trabalho, foi obtida a CLC do aço HSLA440 sem emprego de lubrificação, simulando uma condição mais crítica de ensaio, com força no prensa-chapas de F1 de 1002kN (força máxima da prensa), com travamento quase que total do corpo de prova, com escorregamento do flange de 0,3 mm. A Figura 36 mostra o diagrama limite de conformação do aço HSLA440 definido através do ensaio Nakazima para vários corpos de prova. Na Figura 37, sobre a DLC desse aço, foi traçada a curva limite de conformação para a força de 1002kN e na figura 38 é mostrada a CLC para essa força no prensa-chapas. Observa-se por estas figuras

que a CLC foi traçada sobre os pontos de máxima deformação, ou seja, sobre os pontos mais elevados do DLC.

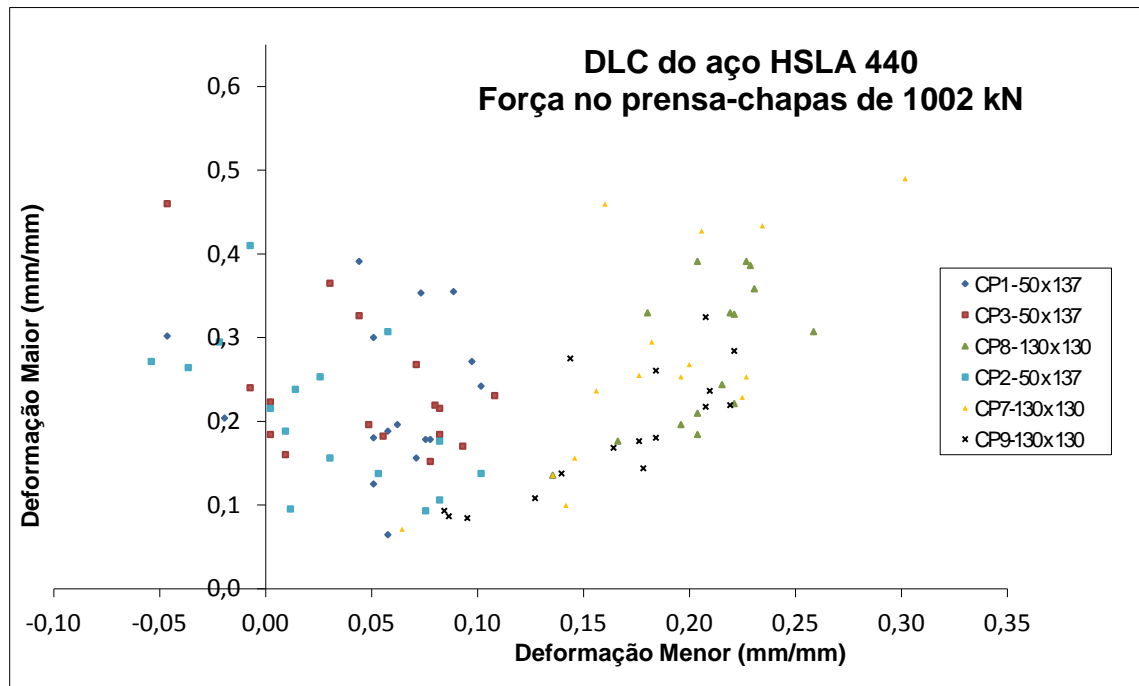


Figura 36 – DLC do aço HSLA440 obtida pelo ensaio Nakazima com CPC=1002kN.

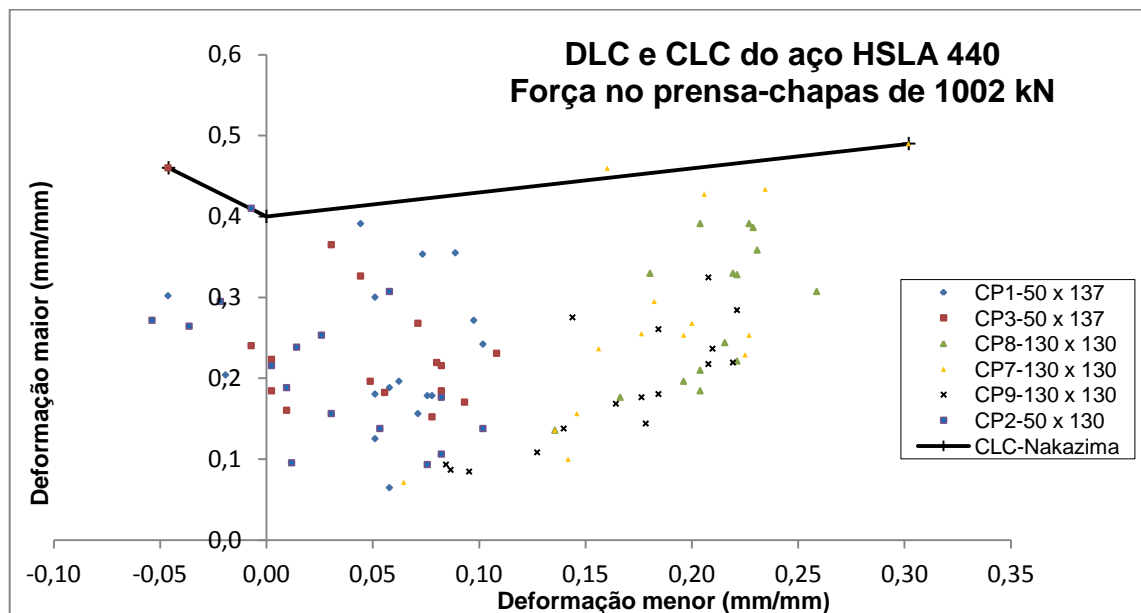


Figura 37– DLC e CLC do aço HSLA440 obtida pelo ensaio Nakazima com FPC=1002 kN.

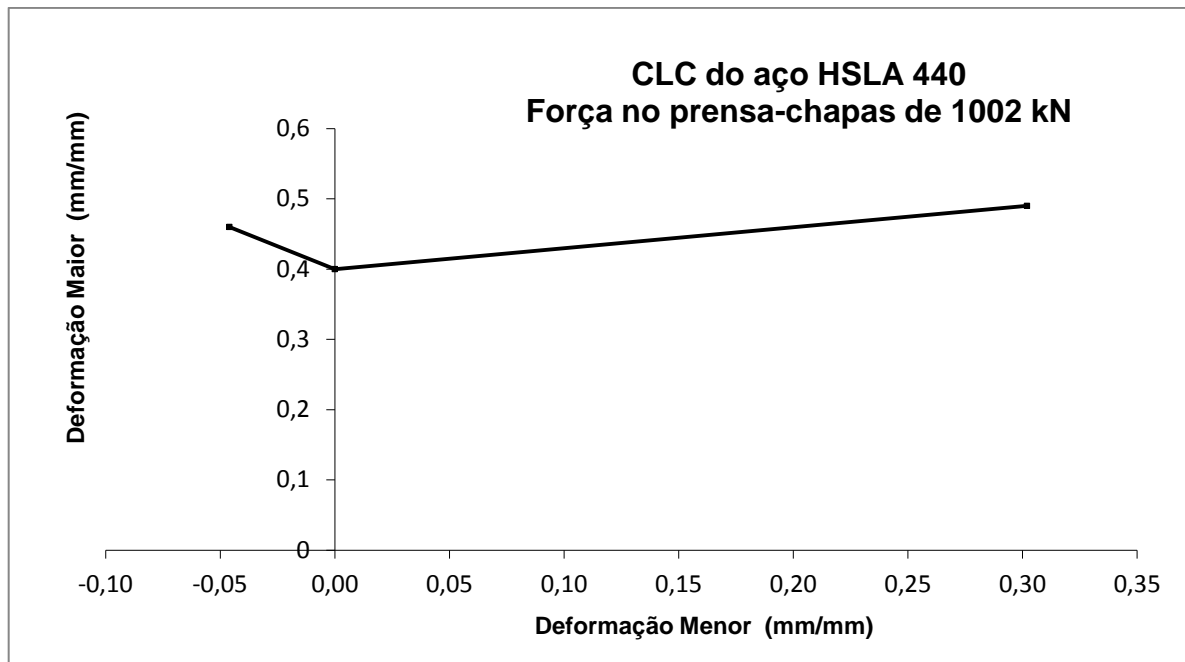


Figura 38 – CLC do aço HSLA440 obtida pelo ensaio Nakazima com CPC=1002 kN.

6.1.4 Influência da variação da força do prensa chapas na CLC do aço HSLA 440

Com o objetivo de se verificar a influência da força no prensa-chapas na conformabilidade do aço HSLA440, foram realizados ensaios Nakazima com variação dessas forças (F2 401kN e F3 300,6kN). Dessa maneira para cada FPC ensaiado foram medidos os pontos de deformação máximos atingidos pelo aço até a sua ruptura. A partir desses valores foi obtida a CLC para cada força e comparada à CLC obtida inicialmente com a força de F1 1002kN. A Figura 39 mostra o diagrama limite de conformação do aço HSLA440 definido através do ensaio Nakazima para força de 401kN. Na Figura 40, sobre a DLC desse aço, foi traçada a curva limite de conformação para a força de 401kN e na Figura 41 é mostrada a CLC para essa força. Também observa-se nestas figuras que a CLC foi traçada nos pontos de máxima deformação.

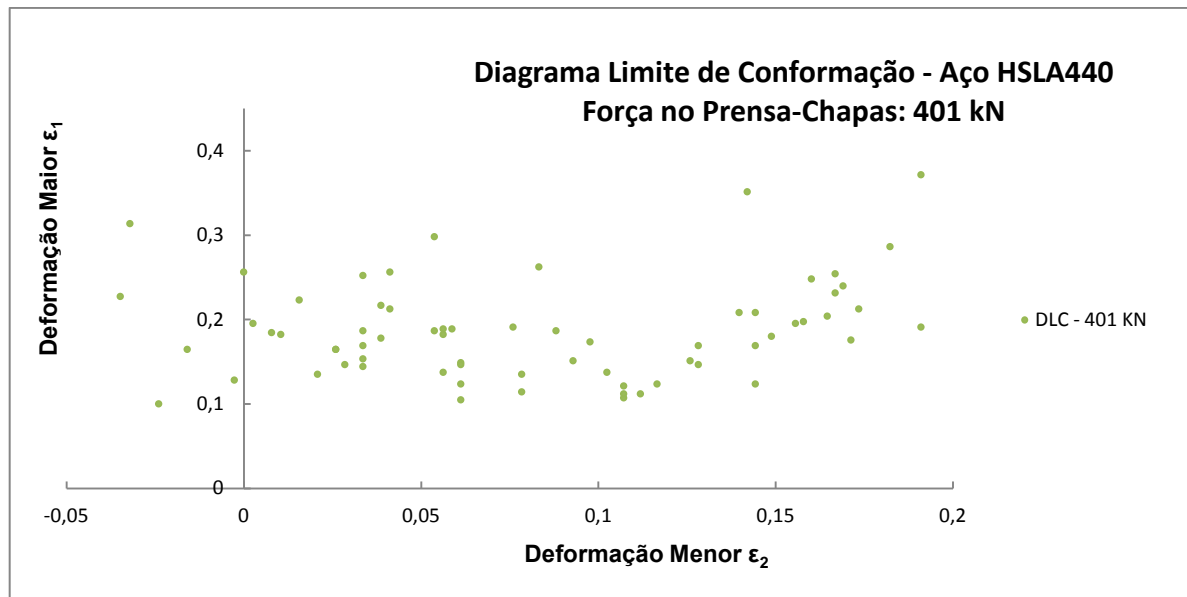


Figura 39 – DLC do aço HSLA440 obtida pelo ensaio Nakazima com FPC de 401kN.

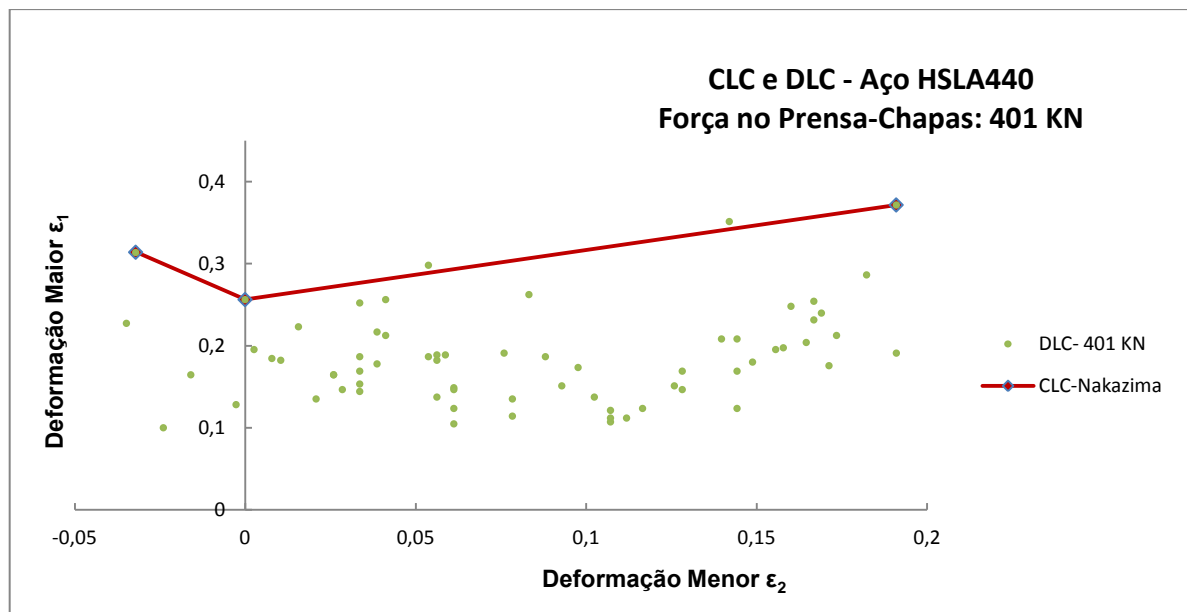


Figura 40 – DLC e CLC do aço HSLA440 obtida pelo ensaio Nakazima com FPC de 401kN.

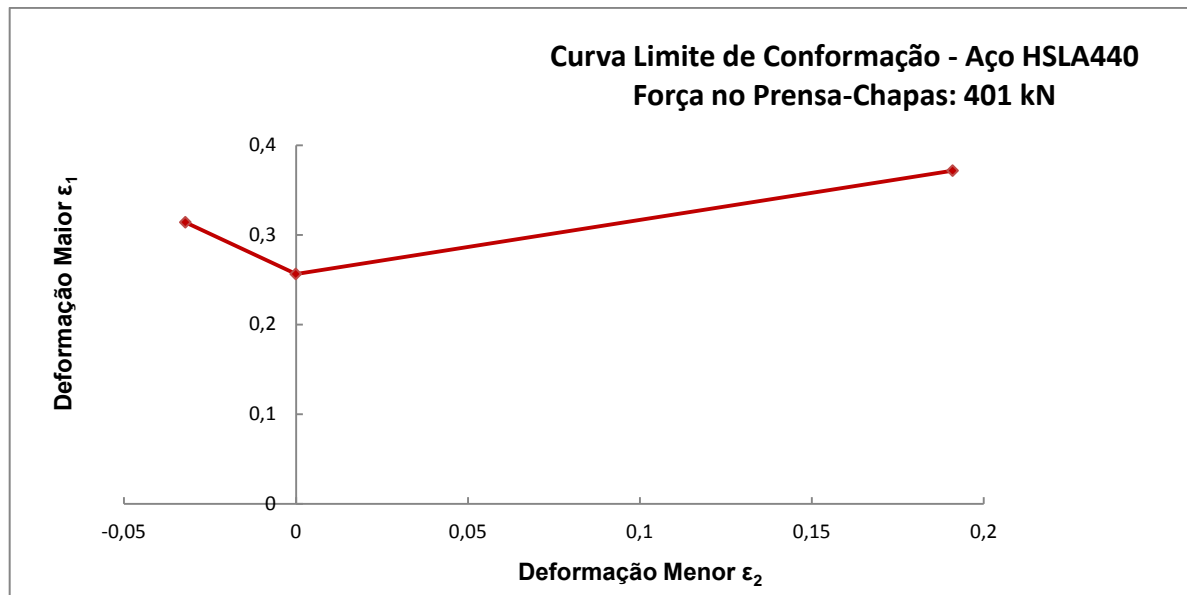


Figura 41 – CLC do aço HSLA440 obtida pelo ensaio Nakazima com FPC de 401kN.

A Figura 42 mostra o diagrama limite de conformação do aço HSLA440 definido através do ensaio Nakazima para força de 300,6kN. Na Figura 43, sobre a DLC desse aço, foi traçada a curva limite de conformação para a força de 300,6kN e na Figura 44 é mostrada a CLC para essa força.

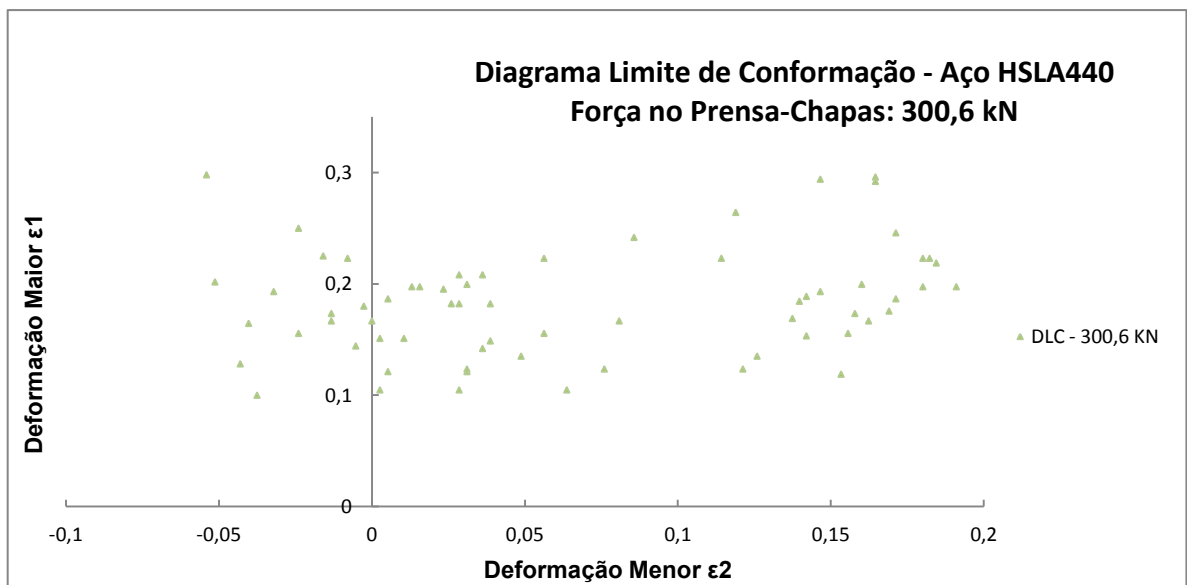


Figura 42 – DLC do aço HSLA440 obtida pelo ensaio Nakazima com FPC 300,6 kN.

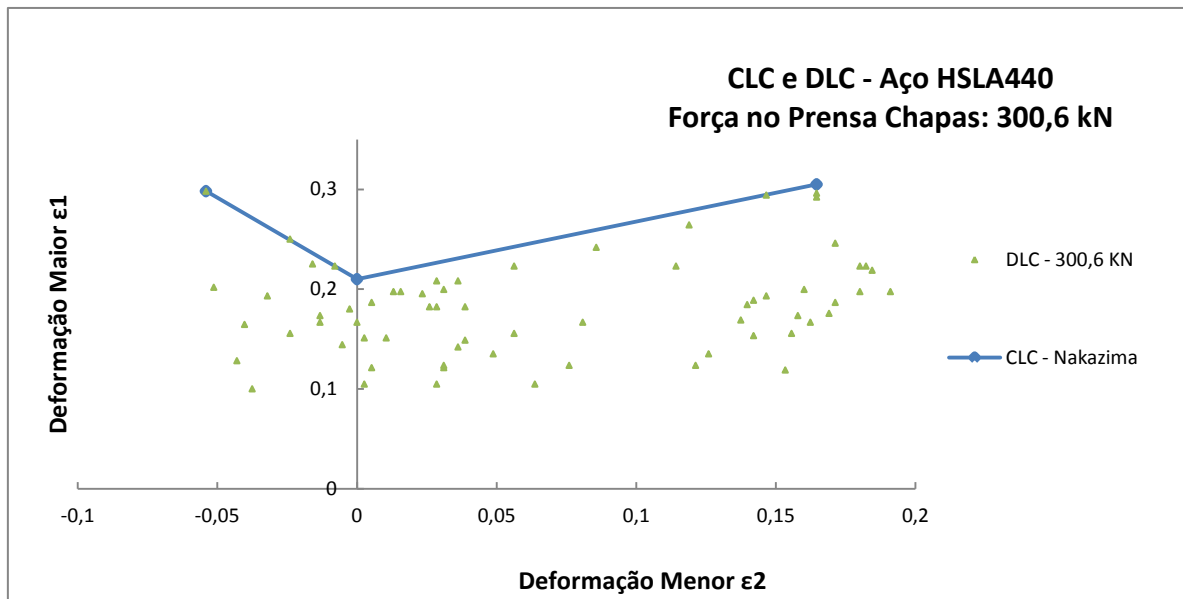


Figura 43 – DLC e CLC do aço HSLA440 obtida pelo ensaio Nakazima com FPC de 300,6kN.

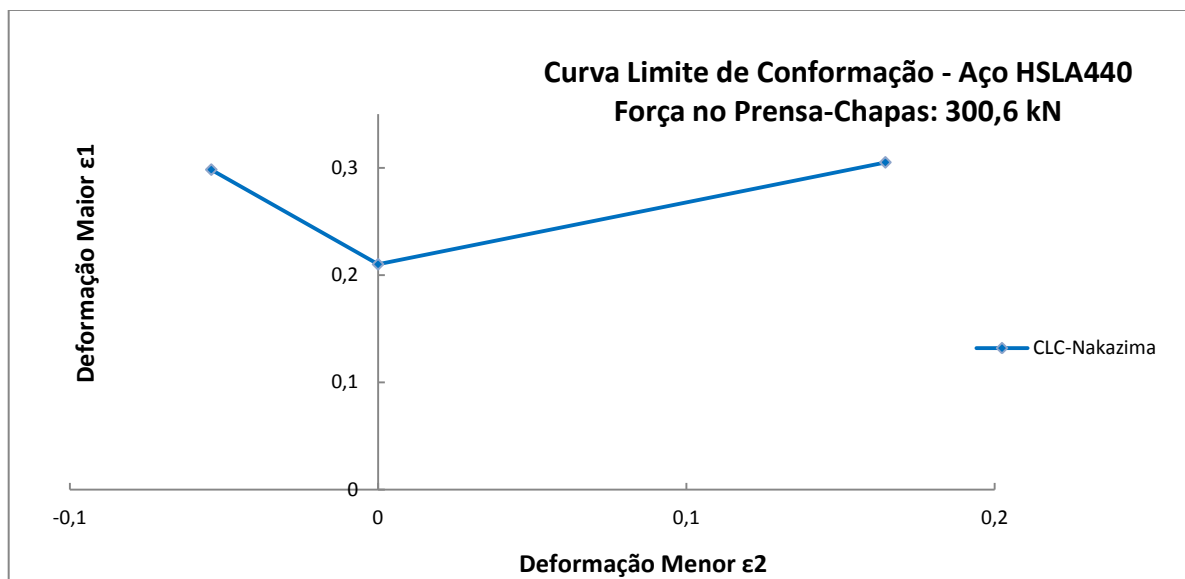


Figura 44 – CLC do aço HSLA440 obtida pelo ensaio Nakazima com FPC de 300,6kN.

Percebe-se pela Figura 45 o deslocamento para baixo da curva CLC para a força de F2 de 401kN, caracterizando assim uma perda de conformabilidade com esta força no prensa-chapas, ou seja, o aço HSLA440 atingiu um menor nível de deformação até a sua ruptura para esta força. Nesta condição de carregamento do prensa-chapas observou-se um escorregamento de 0,895 mm do material na região do flange (região de atuação do prensa-chapas). Pode-se dizer que a diminuição na

restrição imposta pelo prensa-chapas à deformação do material permitiu uma certa redução na conformabilidade do aço em estudo. Seguindo esta mesma linha de raciocínio foi executado ensaio Nakazima com a força F3 de 300,6kN. Como esperado, houve também a redução do limite de conformabilidade do aço HSLA440, observado pelo deslocamento para baixo da CLC, como mostrado na mesma figura. Este deslocamento para baixo das CLC's com a diminuição da carga no prensa-chapas foi também observado por Chemin (2011) e Gipiela (2012) em suas teses de doutorado. Eles usaram os aços DP600 e CPW800, respectivamente, aços estes de maior resistência, porém, com comportamento semelhante ao aço HSLA440 no que se refere à força no prensa-chapas. Dessa forma podemos concluir que os aços, embora possuam resistências diferentes, apresentam comportamento semelhante quanto a sua conformabilidade, no que se refere à variação da força no prensa-chapas.

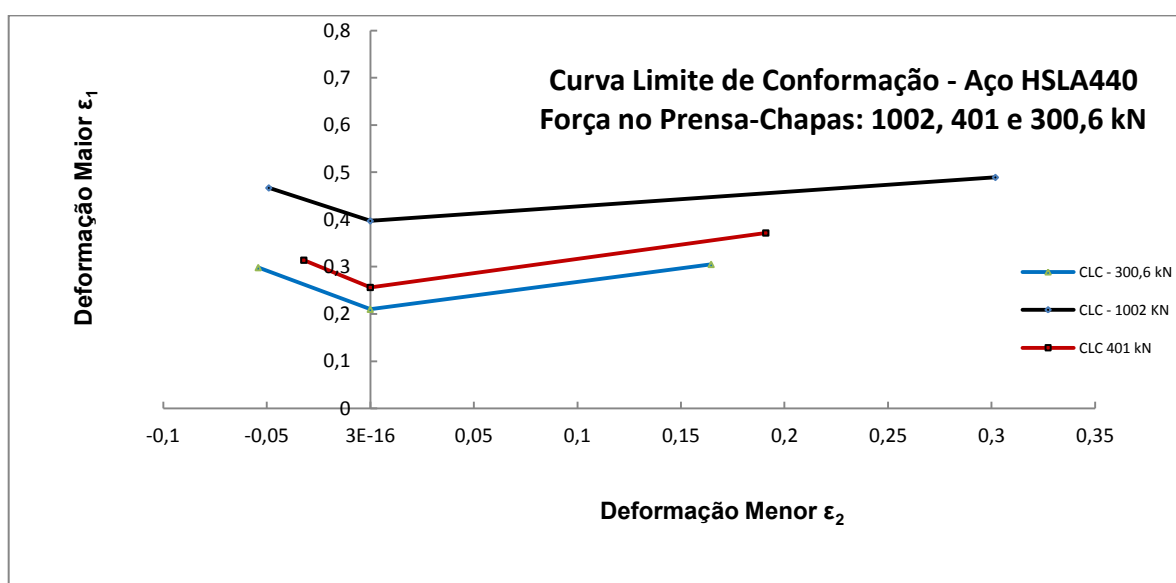


Figura 45 – Comparação entre as curvas limites de conformação obtidas pelo ensaio Nakazima para forças no prensa-chapas de 1002, 401 e 300,6kN.

A redução da força no prensa-chapas para F3 de 300,6kN conferiu aos CP's ensaiados uma maior liberdade de escorregamento durante a estampagem, o qual foi de 0,925 mm do material na região do flange. Em situações práticas, muitas vezes, a força do prensa-chapas é ajustada pelo valor mínimo necessário para se evitar o enrugamento do flange, imaginando se obter assim uma melhor estampabilidade pela mínima restrição imposta ao material durante o seu

escoamento. Percebe-se que esta consideração mostrou-se equivocada para o aço HSLA440. De posse desses dados fica evidente a influência da variação da força no prensa-chapas na conformabilidade do aço HSLA440. A explicação para a diminuição da estampabilidade com a diminuição da força no prensa-chapas é a mudança do tipo de trinca do material em função do aumento do escoamento da chapa sobre o ombro da matriz. O aumento de dobramento nessa área torna-se mais acentuado à medida que o material tem mais liberdade para escoar durante a estampagem. Nesta área de dobramento ocorre encruamento do material que, quanto mais acentuado, mais aproxima o aço do seu limite de resistência, podendo chegar a ultrapassá-lo, ocasionando um princípio de estricção localizada neste ponto. A medida que a chapa é empurrada para dentro da matriz este ponto torna-se propício a uma fratura por cisalhamento (CHEMIN, 2011). À medida que se aumenta a força no prensa-chapas a região da chapa que sofre dobramento avança muito pouco para dentro da cavidade da matriz, de maneira que a ruptura não ocorre por cisalhamento e sim por estiramento sofrido pela chapa.

Com o objetivo de se realizar uma análise mais detalhada quanto ao efeito da força no prensa-chapas na conformabilidade do aço HSLA440 estampado nos ensaios Nakazima, foram plotados gráficos da taxa de deformação no flange em função da força no prensa-chapas aplicada em cada ensaio. Através da instalação de um CLP - Controlador Lógico Programável na prensa hidráulica foi possível a obtenção de dados necessários para a plotagem. A Tabela 9 mostra os valores do tempo total de estampagem (t_e) para as cargas de 1002, 401 e 300,6kN no prensa-chapas e também o valor correspondente ao deslocamento do material no flange (Δdf) e a velocidade de escoamento (V_2) da chapa na região do flange dos CP's em cada condição de força aplicada no prensa-chapas.

Tabela 9. Tempo de estampagem , deslocamento da chapa e velocidade de escoamento da chapa no flange para diferentes cargas no prensa-chapas.

CPC(kN)	$t_e(s)$	$\Delta df(mm)$	$v_2(\frac{mm}{s})$
1002	25,7	0,3	0,01197
401	19,87	0,895	0,04504
300,6	20	0,925	0,04625

O Δdf (deslocamento do material no flange) foi obtido pela medição direta do corpo de prova nesta região e que corresponde à redução ocorrida pela amostra na região de ação do prensa-chapas em uma direção radial de escoamento do material.

A velocidade de escoamento da chapa no flange (V_2) que segundo Kim et al (2011), pode ser interpretada como a taxa de deformação nesta região, foi obtida pela divisão do deslocamento Δdf pelo tempo de estampagem t . Também pela divisão do deslocamento do punção (profundidade de estampagem média de 14,99 mm) de cada CP ensaiado pelo tempo total médio de estampagem, que foi de 21,65 s permite a determinação da velocidade de embutimento (V_1) que é de 0,6924 mm/s nesses ensaios. De posse desses dados foi possível a obtenção da curva que mostra a variação de velocidade de escoamento no flange (V_2) em função da força no prensa-chapas mostrado na Figura 46.

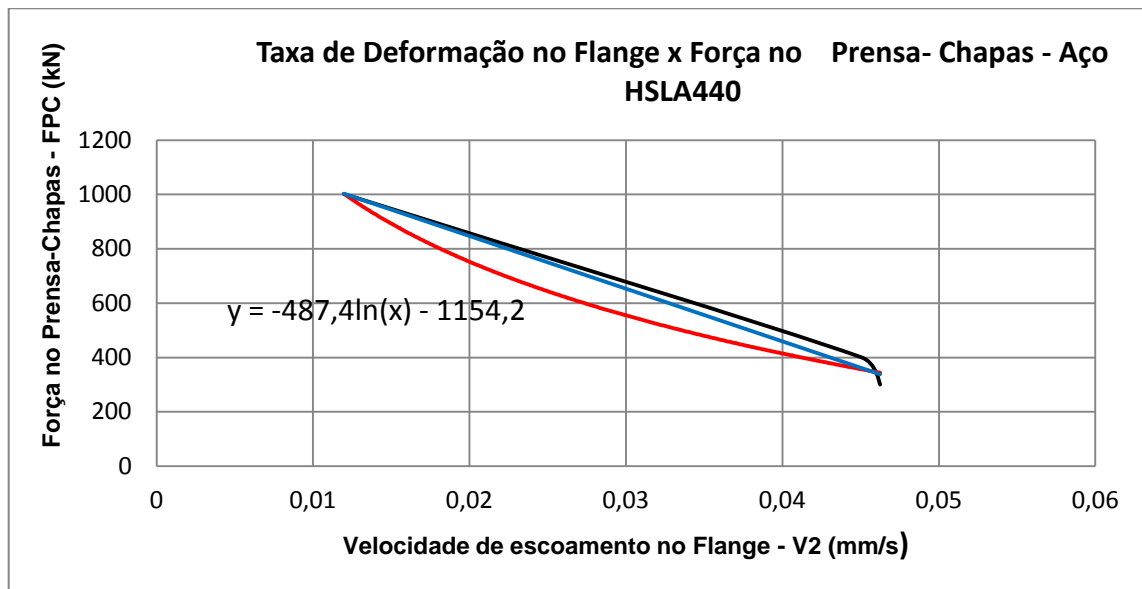


Figura 46 – Variação da taxa de deformação no flange em função da força no prensa-chapas.

Pela linha de tendência da Figura 70 foi determinada a equação da força no prensa-chapas:

$$FPC = -487\ln(V_2) - 1154,2 \quad (17)$$

Onde:

FPC Força no prensa-chapas

V_2 Velocidade de escoamento da chapa

Quando há uma condição de restrição total da amostra no flange, ou seja, a taxa de deformação V_2 se aproxima muito de zero, pela Equação 15 a força no prensa-chapas é igual a 2212,64kN. Outra condição é quando V_2 tende a ser máxima e se usa a equação proposta por Wagoner et al (2011).

$$\dot{\epsilon}_{\max} = \frac{V_1(mm/s)}{3t(mm)} \cdot \ln(1 + t/rd) \quad (18)$$

Para a velocidade V_1 de 0,6924 mm/s, espessura da chapa t de 1,5 mm e raio do ombro da matriz rd de 10 mm encontra-se uma taxa máxima de deformação de 0,022/s que, pela equação da curva de tendência da Figura 70, equivale a um valor de força no prensa-chapas de 706,07 kN. Desta maneira, acrescentados os valores das taxas de deformação (V_2) para as forças de 706,07 kN e 2212,64 kN é obtido o gráfico da variação da taxa de deformação no flange (V_2) em função da força no prensa-chapas (FPC) mostrado na Figura 47.

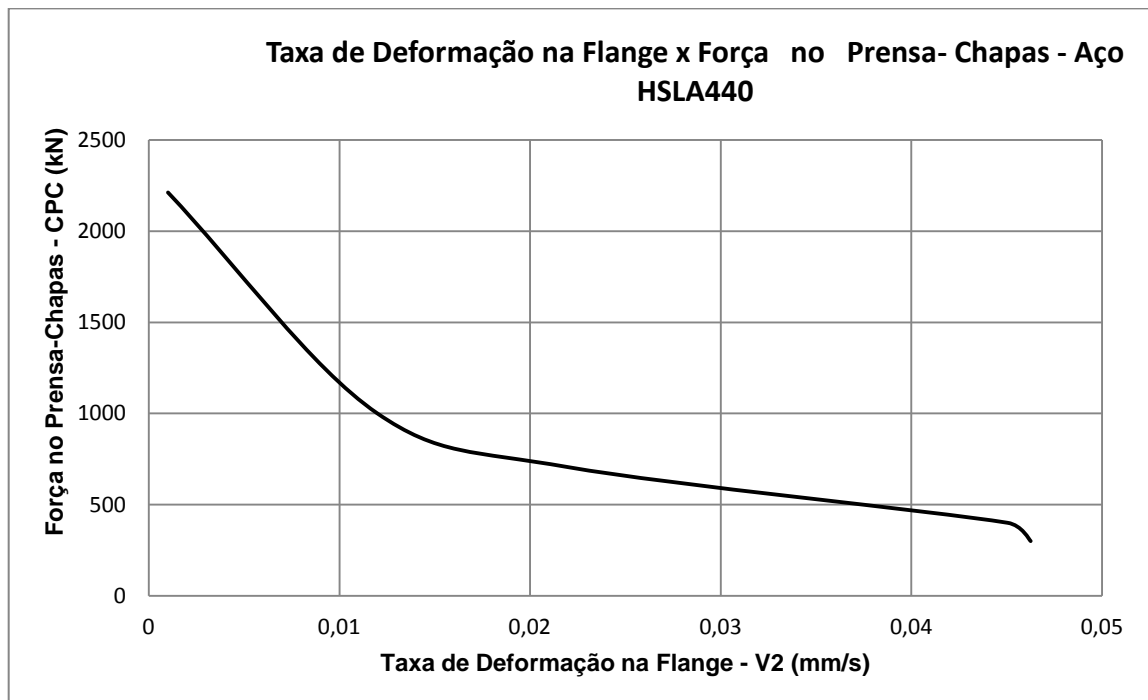


Figura 47 – Variação da taxa de deformação no flange em função da força no prensa-chapas, com as forças de 2212,64 kN e 706,07 kN.

A FPC de 2212,64kN corresponde a carga calculada onde ocorreria o travamento total da amostra na região da flange pelo prensa-chapas e que corresponde a máxima FPC a ser aplicada em ensaios Nakazima para o aço HSLA 440 empregando o ferramental utilizado neste trabalho. Como acima da força crítica de 706,07 kN ocorre uma pequena taxa de deformação pode-se concluir que com o uso de forças acima da mesma consegue-se menores escorregamentos das amostras permitindo avaliar de forma confiável a conformabilidade do aço HSLA 440.

7 CONCLUSÃO

7.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

Pela apresentação da composição química e ensaios metalográficos conclui-se que o aço HSLA 440 apresentou as características esperadas conforme a literatura deste aço. Foi possível a visualização, através da análise da microestrutura, da matriz ferrítica-perlítica com traços de bainita e martensita.

Através dos ensaios de tração, pôde-se caracterizar o aço HSLA440 como sendo um material destinado a operações que exigem um certo nível de estampagem, uma vez que o fator de anisotropia e especialmente, o coeficiente de encruamento, apresentaram valores suficientemente elevados a ponto de garantir esta característica do material.

7.2 INFLUÊNCIA DA FORÇA DO PRENSA-CHAPAS

Pelos resultados apresentados, pode-se concluir que a força no prensa-chapas tem uma influência direta na conformabilidade do aço HSLA 440 quando comparados às curvas limites de conformação para as diferentes forças no prensa-chapas utilizadas com CLC obtidas pelo ensaio Nakazima.

Também se conclui que existe um valor de força no prensa-chapas ideal para o aço HSLA 440, onde se tem um grau de escoamento limite para que a chapa apresente um ganho em conformabilidade, verificado através da elevação da CLC. Ao contrário, a redução da força no prensa-chapas abaixo de um determinado limite, leva o material a uma perda de conformabilidade em consequência do maior escoamento sofrido durante a estampagem, uma vez que há comprometimento da ductilidade do aço pela ocorrência de fratura por cisalhamento.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Realização de ensaios com uma prensa hidráulica de maior capacidade de carga, a fim de se verificar o efeito da força no prensa-chapas na estampabilidade desses materiais.
2. Desenvolver um modelo computacional para analisar, através do método de elementos finitos, os efeitos de diferentes forças no prensa-chapas na conformabilidade do material.
3. Repetir os ensaios para outros aços de alta resistência para verificar o comportamento dos mesmos quanto a conformabilidade quando se varia a força no prensa-chapas.

Referências

ALTAN, T.; NASSER, A.; YADAV, A.; PATHAK, P. ***Determination of the flow stress of five AHSS*** AL-QURESHI, H.A. **Apostila de conformação e instabilidade plástica de chapas metálicas e vasos de pressão**, 2003.

ANDRADE, S. L., TAISS, J. M., ROSA, L. K. **O aço no automóvel do futuro**. In: 57º Congresso ***sheet materials (DP600, DP780, DP780-CR, DP780-HY and TRIP780) using the uniaxial tensile and the biaxial Viscous Pressure Bulge (VPB) tests***. *Journal of Materials Processing Technology*, 210., p.429-436, 2010.

ARAÚJO NETO, J.B. **Elevação do Nível de Estampabilidade em Aço Laminado a Frio com Recozimento em Forno Caixa**, 60º Congresso Anual ABM, pp 75-82, 2005.

ASGARI, S. A.; PEREIRA, M.; ROLFE, B. F.; DINGLE, M.; HODGSON, P. D., ***Statistical analysis of finite element modeling in sheet metal forming and springback analysis***. *Journal of Materials Processing Technology*, 203., p. 129-136, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6673**: Produtos Planos de Aço – Determinação das Propriedades Mecânicas a Tração. 1981.

AYRES, R.A.; BRAZIER, W.G.; SAJEWSKI, V.F. ***Evaluating the Limiting Dome Height Test as a New Measure of Press Formability***, *J. Appl. Metalwork.*, Vol 1 (No. 1), 1979, p 41-49.

BACKOFEN, W.A. *Massachusetts Institute of Technology Industrial Liaison Symposium, Chicago*, 1974.

BASTOS,A.L. **Análise do processo de estampagem de chapas de aço através da curva limite de conformação.** Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil),UFSC,2009.

BOYLES, M.W., CHILCOTT, H.S. ***Recent developments in the use of the stretchdraw test.*** *Sheet Metal Industries*, 1982, p. 149 – 156.

CARLSSON, P. ***Surface Engineering in Sheet Metals Forming***, *Dissertation presented at Uppsala University for the degree of Doctor of Philosophy*, Teknikdalen, Borlänge, 2005.

CHEMIN Filho, Ravilson. **Estudo da fratura de aços de nova geração DP600 através da variação de pressão no prensa chapas.** Tese (Doutorado em Engenharia de Fabricação), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica-UFPR, Curitiba, 2011.

F.B. PICKERING, ***Physical Metallurgy and the Design of Steels***, *Applied Science Publishers Ltd., London*, 1978, p. 60 – 88.

FERNANDES, J.M. **Estudo da Fabricação de Latas em Folhas-de-Flandres pelos Processos de Embutimento Profundo e Estiramento.** Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Unicamp, Campinas, 1998.

FERRARINI, J.L. **Caracterização de Materiais para o processo de Estampagem.** Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e Materiais, UFRGS, Porto Alegre, 2004.

FERREIRA FILHO, A.; LIMA, L.M. G.; PADILHA, A.F.; LIMA, N.B. **Controle da microestrutura e da textura de chapas de aço baixo carbono para estampagem.** *II Workshop sobre textura e relações de orientação*. 2a. ed., São Paulo, 2003, p. 248-260.

FERREIRA FILHO, A.; PLAUT, R.L.; BOMFIM, M.F.; LIMA, M.B. **Efeito da Textura Cristalográfica na Anisotropia Plástica Planar em Aços para Estampagem Profunda**. 42º Seminário de Laminação, ABM, pp 153-163, 2005.

FOLLE, L.F. **Metodologia de Medição do Coeficiente de Atrito em Estampagem e Avaliação da Influência da Lubrificação e Condições Superficiais Via Simulação Numérica**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e Materiais, UFRGS, Porto Alegre, 2008.

FROMMANN, K.M. ***The Prediction of Metal Stamping Behavior***, in *Proceedings of the American Metal Stamping Association Conference* (Detroit), 1968, p 1-55.

GHOSH, A.K. ***The Effect of Lateral Drawing-in on Stretch Formability***, *Metals Eng. Quarterly*, Vol. 15, no. 3, pp. 53-61, 64. 1975.

GIPIELA, M.L. **Estudo da expansão de furos e estampabilidade de chapas de aço multifásico CPW800**. Tese de doutorado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. UFPR. Curitiba, 2012.

GORNI, A. A. **Aços avançados de alta resistência: Microestrutura e propriedades mecânicas**, 5º Congresso de Corte e Conformação de Metais, Aran da Eventos, São Paulo, Outubro de 2009.

GRAF, A.; HOSFORD, W.F. ***Calculations of forming limit diagram for changing strain paths***, *Metall. Trans.* 24, 1993.

GRAF, A.; HOSFORD, W.F. ***Metallurgical and Materials Transactions***. v. 21A, 1990, p. 87-94.

HOSFORD, W.F.; CADDELL, R.M. ***Metal Forming - Mechanics and Metallurgy***, Cambridge University Press, Third Edition, 2007.

IISI - *International Iron and Steel Institute, UltraLight Steel Auto Body - Advanced Vehicle Concepts (ULSAB-AVC) Overview Report (2002)*, disponível em: www.worldautosteel.org.

KASPER, A.S.; GEORGE, R.A.; DINDA, S. *Estimating Yield Strength From Hardness Data*, *Met. Prog.*, 1976, p 30-35.

KEELER, S.P. *Determination of Forming Limits in Automotive Stampings*, *Society of Automotive Engineers*, 1965.

KEELER, S.P. *The Science of Forming, Vol. 1*, *Precision Metalforming Association*, 2003.

KEELER, S.P. *The Science of Forming, Vol. 2*, *Precision Metalforming Association*, 2005.

KLEIN, L.N.T. et al. *Curvas Limite de Conformação (CLC)*, *Centro de Pesquisa da Usiminas*, RV7827, 1981.

KIM, S. B.; HUH, H.; BOK, H. H.; MOON, M. B. *Forming limit diagram of auto-body steel sheets high-speed sheet metal forming*. *Journal of Materials Processing Technology*, 211., p.851-862, 2011.

KONIECZNY A. *Advanced High Strength Steels – Formability, 2003 Great Designs in Steel*, *American Iron and Steel Institute (February 19, 2003)*, www.autosteel.org. Krieg, R.D. A practical two surface plasticity theory. *J. of App. Mech.*, p. 641– 646, 1975.

LAJARIN, S. F. *Influência da variação do módulo de elasticidade na previsão computacional do retorno elástico em aços de alta resistência*. Tese (Doutorado em Engenharia de Fabricação), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica- UFPR, Curitiba, 2012.

LANGE, K. **Forming Handbook**. Ed. McGraw Hill and SME, New York, 1993.

MARCINIAK, Z.; DUNCAN, J.L.; HU, S.J. **Mechanics of sheet metal forming**. Butterworth-Heinemann, 2002.

MARCONDES, P.V.P. Conformação de Chapas Metálicas, 2003. *Metal forming handbook / Schuler*, Springer, 1998.

Metals Handbook ASM, vol. 14 – *Forming and Forging*, ASM International, 1993.

MIELNIK, E.M.; **Metalworking Science and Engineering**, McGraw-Hill, USA, 1991.

MOREIRA, L.P., et al. **Análise numérica e experimentação da influência da espessura inicial nas deformações limites em chapas**.

VI Conferência Nacional de Conformação de Chapas, pp. 39-49, 2003.

NAKAZIMA, K.; KIKUMA, T.; HASUKA, K. **Study on Formability of Steel Sheets**. Yawata Tech. Rep., pp141, 1968.

NBR 5915 - Chapas finas a frio de aço-carbono para estampagem, ABNT, 2003.

NBR 6655 Chapas de aço com características melhoradas de propriedades mecânicas, conformabilidade e soldabilidade , ABNT, 2003.

PEREIRA, J.F.B.; ALVARENGA, E.A.; BARCELOS, H. **Influência de revestimentos metálicos no valor “r” de Lankford de aços laminados a frio**. In: Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 1995, Curitiba. Anais... São Paulo: ABM, 1995. p. 443-448.

PLAUT, R.L et al. **Efeito da Textura Cristalográfica na Anisotropia Plástica Planar em Aços para Estampagem Profunda**, Congresso Laminação ABM, 2005.

PLAUT, R.L. **Estampabilidade de chapas: ensaios e aplicações**. II Workshop sobre textura e relações de orientação. 2a. ed., São Paulo, 2003, p. 266 - 297.

PLAUT, R.L. **Estampagem dos Aços ao Carbono**, Apostila ABM, 2005

RASHID, M. S. GM 980X –*Applications and Review. International Automotive Engineering Congress Potential and Exposition. S.A.E. Technical Publication n° 770211. Detroit, 12 p., February-March 1977.*

ROCHA, M.R. **Aço ABNT 1045 esferoidizado: estudo da cinética de coalescimento e correlações entre microestruturas e propriedades mecânicas.** Dissertação de Mestrado – PGMAT – UFSC, Florianópolis, 2003.

ROCHA, M.R. **Avaliação do efeito das transformações martensíticas na conformabilidade dos aços 304N e 304H.** Tese de doutorado, PGMAT, UFSC, Florianópolis, 2006.

ROSSI, M. **Estampo en Frio de la Chapa**, Dossat, Madri, 1971.

SANTOS, R.A. **Avaliação de Estampabilidade do Aço DC05 (DIN 10152) e Validação das Deformações Verdadeiras Obtidas via Simulação Numérica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Fabricação), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica- UFPR, Curitiba, 2007.

SEMIATIN, S.L.; JONAS, J.J. **Formability and Workability of Metals: Plastic Instability and Flow Localization.** *ASM Series in Metal Processing*, v. 2, 1984. 299 p.

SILVA, P. S. C. P. **Comportamento Mecânico e Fratura de Componentes e Estruturas Metálicas.** Universidade Federal do Paraná, 1999.

SILVEIRA NETTO, S.E.. **Desenvolvimento do Processo de Construção de Curvas Limite de Conformação.** Dissertação de Mestrado, Curso de Pós Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e Materiais, UFRGS, Porto Alegre, 2004.

SOUZA, S.A. **Ensaaios Mecânicos de Materiais Metálicos**. Edgard Blucher, 1974.

SROUR, E. H. Jr. **Determinação do grau de conformabilidade de chapa de aço para suporte de coluna de direção e identificação de similar nacional**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

SWIFT, H. W. *J. Mech. Phys. Solids*, 1., p. 1, 1952.

TAYLOR, B. ***Formability Testing of Sheet Metals***, General Motors Corporation, 1988.

TIGRINHO, L. M. V. **Influência da Lubrificação na Estampagem Via Análise das Deformações Obtidas em uma Chapa de Aço de Alta Estampabilidade**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

TURAZI, A. **Estudo de Novas Rotas de Processamento para Refino de Grão e seu Efeito na Estampabilidade de Aços ARBL**. Dissertação de Mestrado – PGMAT – UFSC, Florianópolis, 2008.

USIMINAS. **Conformação na prensa**. Usiminas, n. 6, 1999.

XU, S.; WEINMANN, K.J.; CHANDRA, A. ***Analysis of Forming Limits Using the Hill Yield Criterion***. *Journal of Engineering Materials and Technology*, v. 120, p.236-238, 1998.

XUA, S.; WEINMANNB, K.J. ***On Predicting Forming Limits Using Hill's Yield Criteria***. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 9, n. 2, p. 174-182, 2000.

YOSHIDA K.; ABE K.; MIYAUCHI, K.; NAKAGAWA, T. ***Instability and fracture behaviour in sheet metal forming***, IDDRG, Turin, La Metallurgia Italiana nº 8, 1968.

WAGONER, R.H.; GENG, L. Role of plastic anisotropy and its evolution on springback. **Int. J. of Mech. Scie.**, v. 44(1), p.123–148, 2002.

WAGONER, R. H.; KIM, R. J.; SUNG, J. H.; PIAO, K. ***The shear fracture of dual-phase steel.*** *International Journal of Plasticity*, 27., p.1658-1676, 2011.

WILLIAN C. LESLIE, ***The Physical Metallurgy of Steels***, McGraw – Hill Book Company, New York, 1981, p. 189 - 201.